

チュートリアル講演

二重ベータ崩壊 + レプトジェネシス

浜口幸一 (東京大学)

「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」

2017年領域研究会 @ 岡山大学

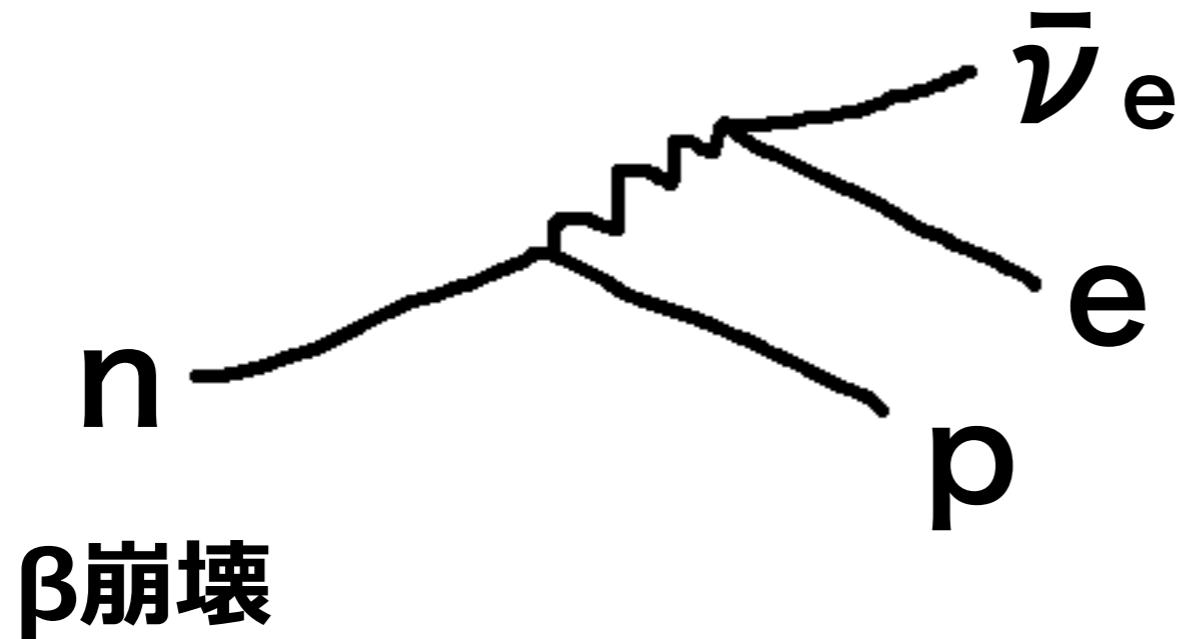
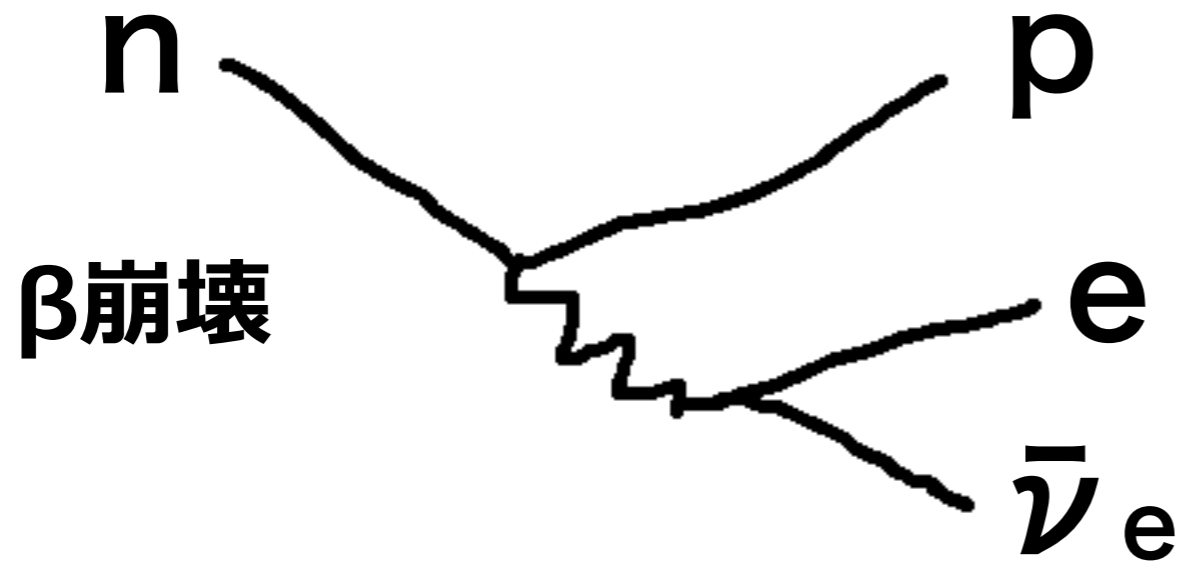
2017年5月21日

もくじ

- (0 $\nu\beta\beta$ 崩壊)
- 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
 - ▶ バリオン数の計算の具体例
- レプトジェネシスと0 $\nu\beta\beta$ 崩壊
- 宣伝

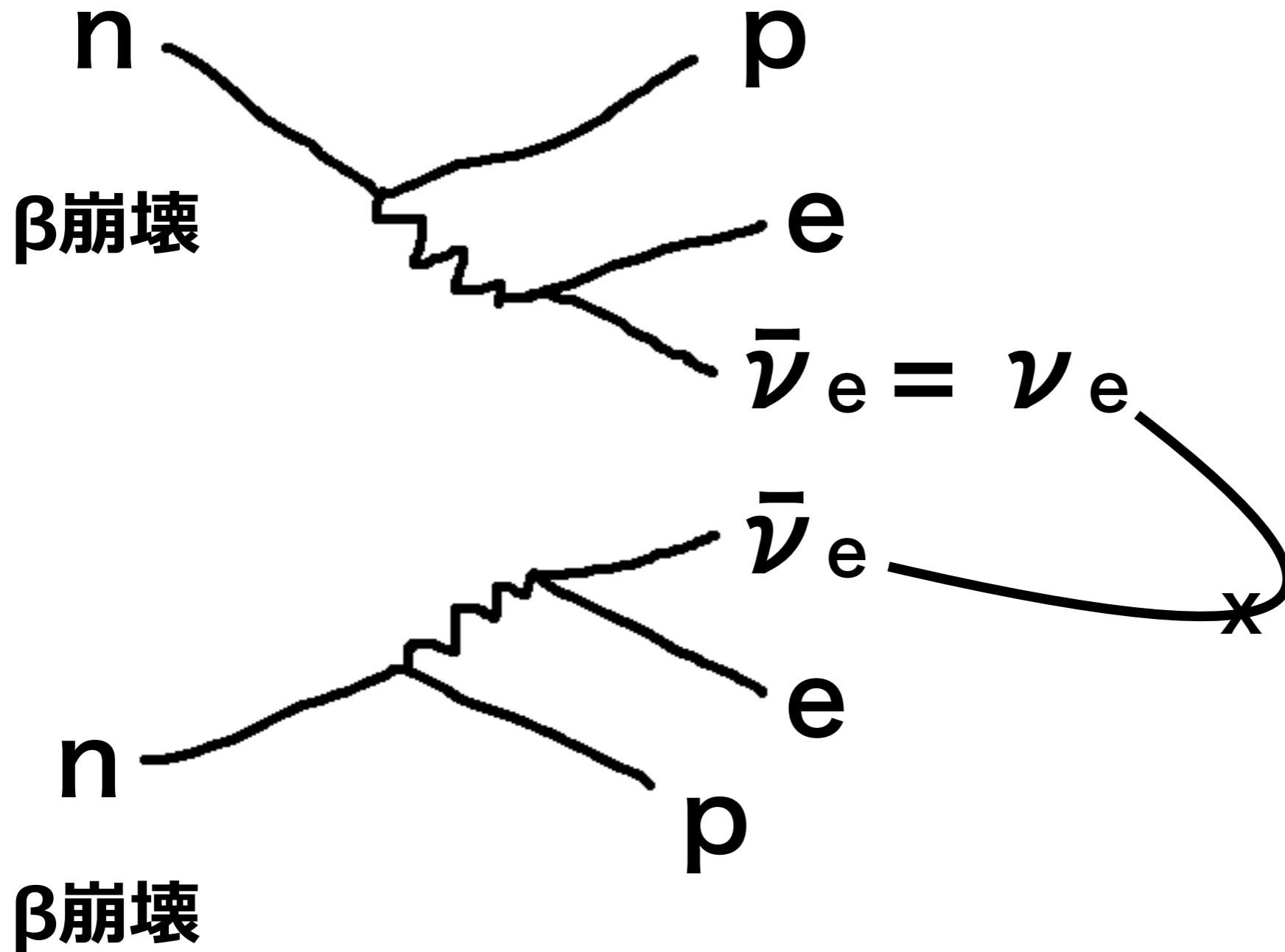
$0\nu\beta\beta$ 崩壊

$0\nu\beta\beta$ 崩壊



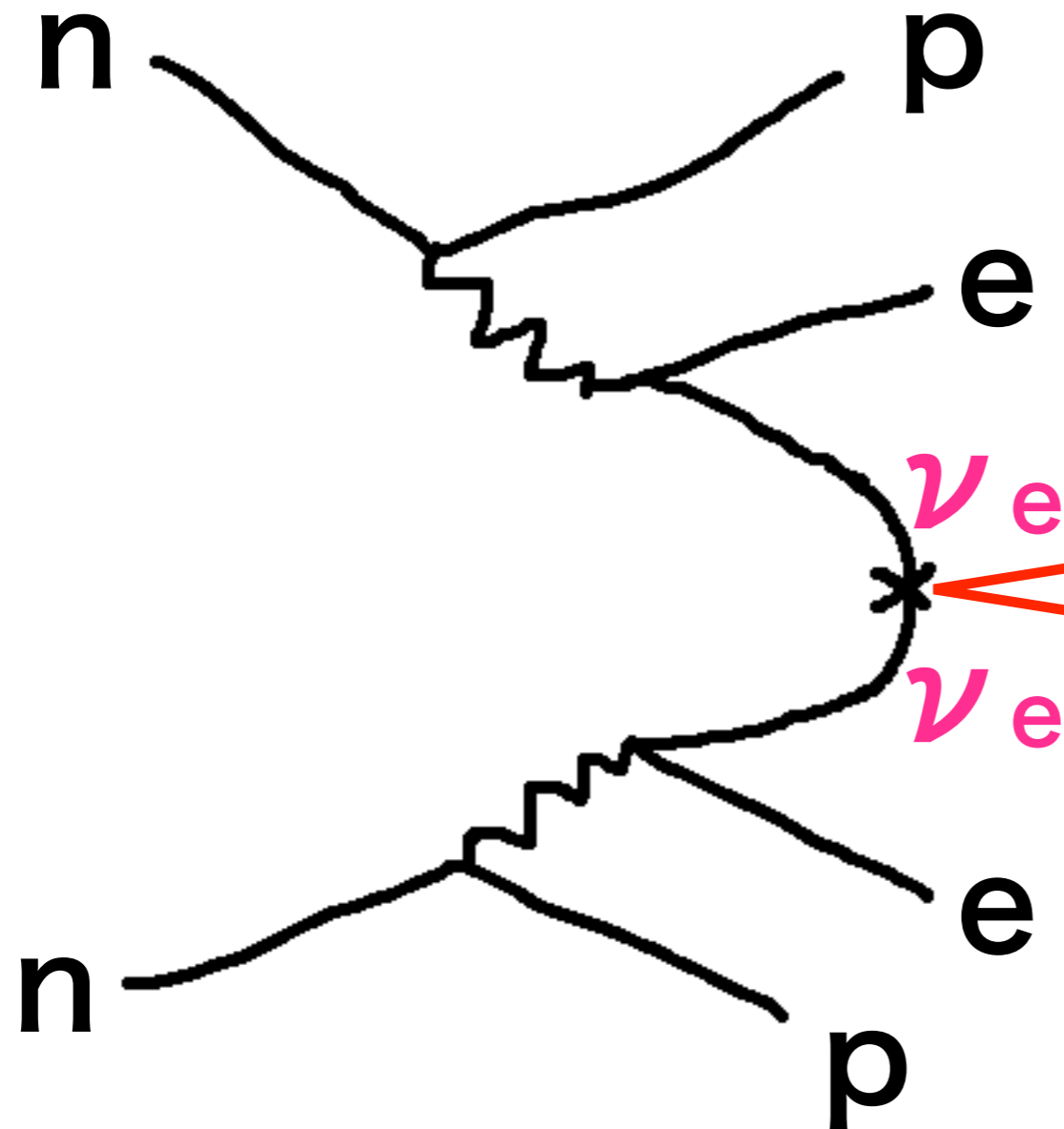
$0\nu\beta\beta$ 崩壊

もしニュートリノ=反ニュートリノ (マヨラナ) なら・・・



$0\nu\beta\beta$ 崩壊

もしニュートリノ=反ニュートリノ (マヨラナ) なら・・・

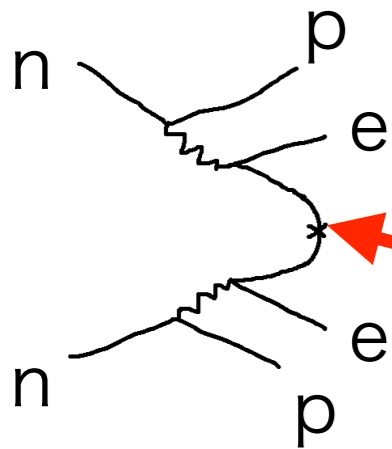


$0\nu\beta\beta$ 崩壊！

$m_{\nu ee}$

$$\begin{pmatrix} m_{\nu ee} & m_{\nu e\mu} & m_{\nu e\tau} \\ m_{\nu\mu e} & m_{\nu\mu\mu} & m_{\nu\mu\tau} \\ m_{\nu\tau e} & m_{\nu\tau\mu} & m_{\nu\tau\tau} \end{pmatrix}$$

$0\nu\beta\beta$ 崩壊



$$m_{\nu ee} = \left| m_{\nu 1} |U_{e1}|^2 + m_{\nu 2} |U_{e2}|^2 e^{i\alpha_2} + m_{\nu 3} |U_{e3}|^2 e^{i(\alpha_3 - 2\delta)} \right|$$

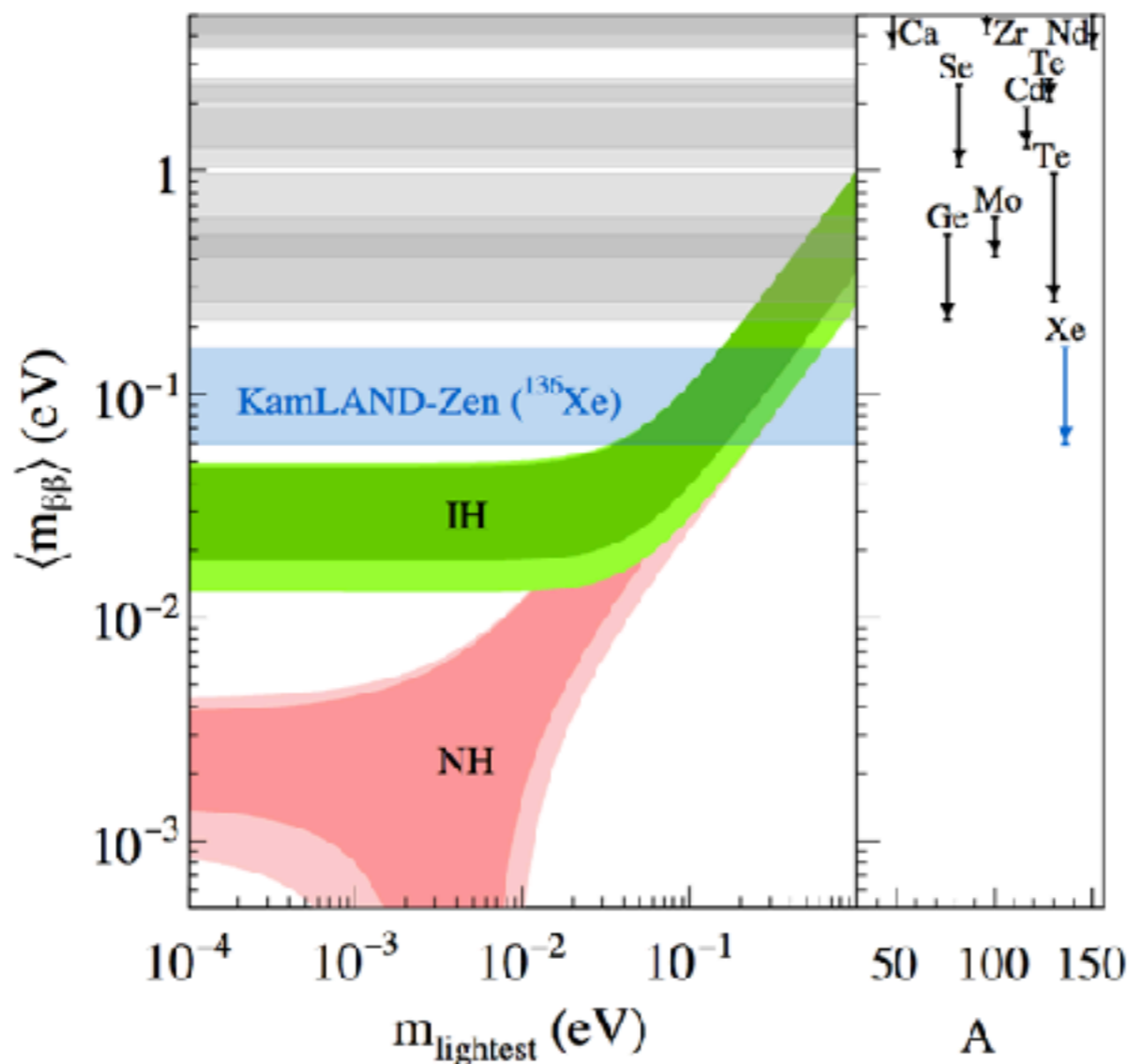
$$\simeq \left| 0.69 m_{\nu 1} + 0.29 m_{\nu 2} e^{i\alpha_2} + 0.022 m_{\nu 3} e^{i(\alpha_3 - 2\delta)} \right|$$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{mixing} \quad : |U_{ei}| \\ \Delta(\text{mass})^2 : m_{\nu i}^2 - m_{\nu j}^2 \end{array} \right.$

ν 振動で測られている。

Majorana CP phases
(ν 振動では見えない)

$m_{\nu ee}$ [eV]



KamLAND-Zen
Phys.Rev.Lett.
117 (2016) 109903
arXiv:1605.02889

m_{ν} -lightest [eV]



もくじ

- (0 $\nu\beta\beta$ 崩壊)

- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性

- ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
- ▶ いつ作られたのか？
- ▶ 作るには何が必要か？

- レプトジェネシス

- ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
- ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
- ▶ バリオン数の計算の具体例

- レプトジェネシスと0 $\nu\beta\beta$ 崩壊

- 宣伝

宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？

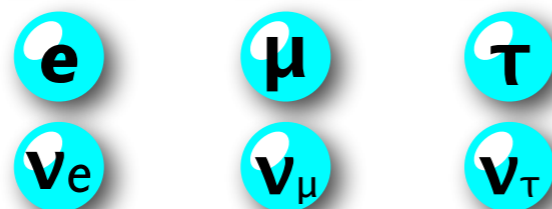
全ての素粒子には **反粒子**が存在する。

粒子

クォーク



レプトン

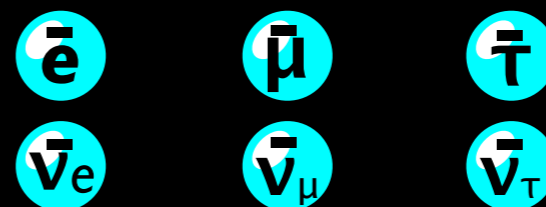


反粒子

反クォーク



反レプトン



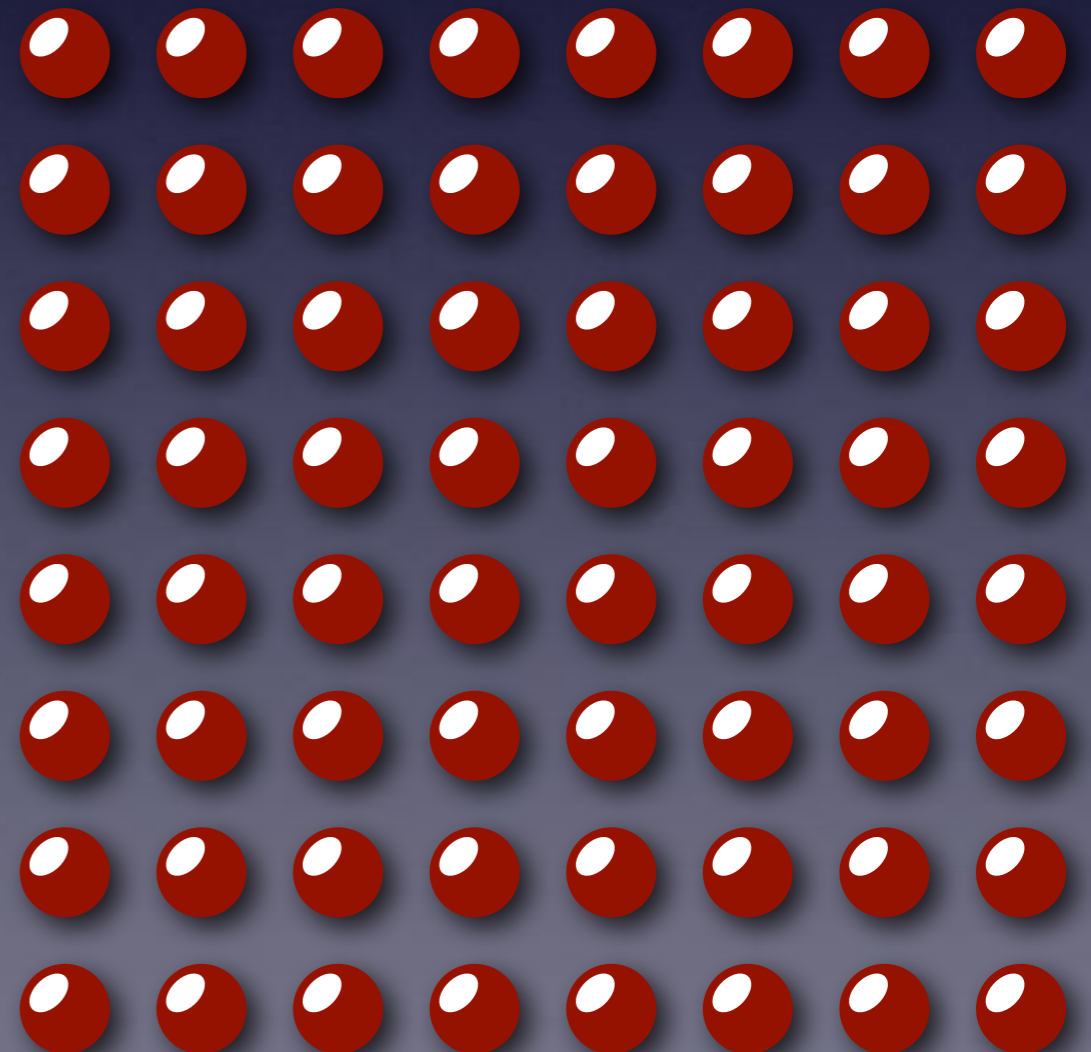
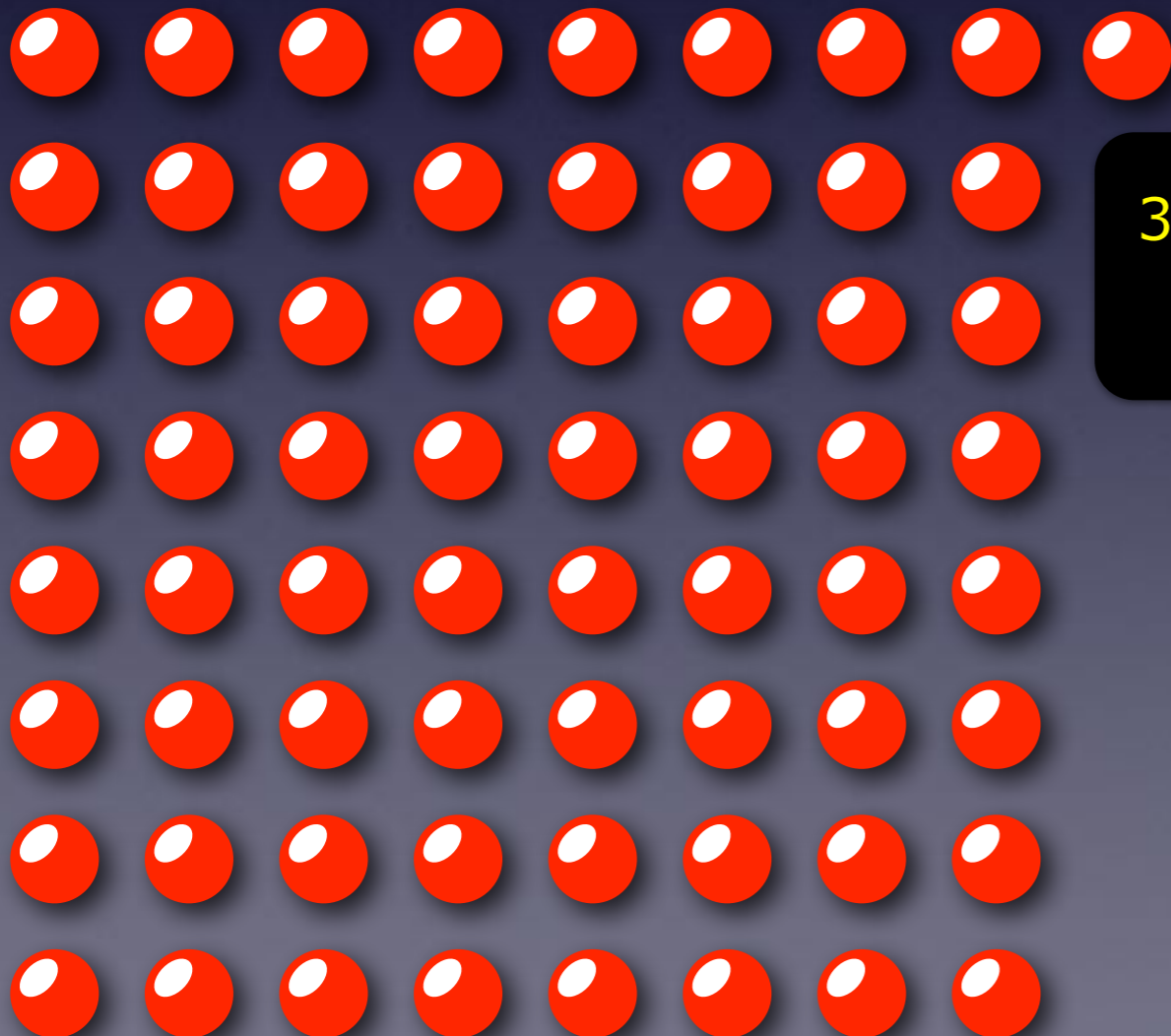
宇宙のずっと始めの頃は・・・

物質と反物質がほぼ同数あった。

ただし物質の方がほんの少しだけ多かった。

物質

反物質



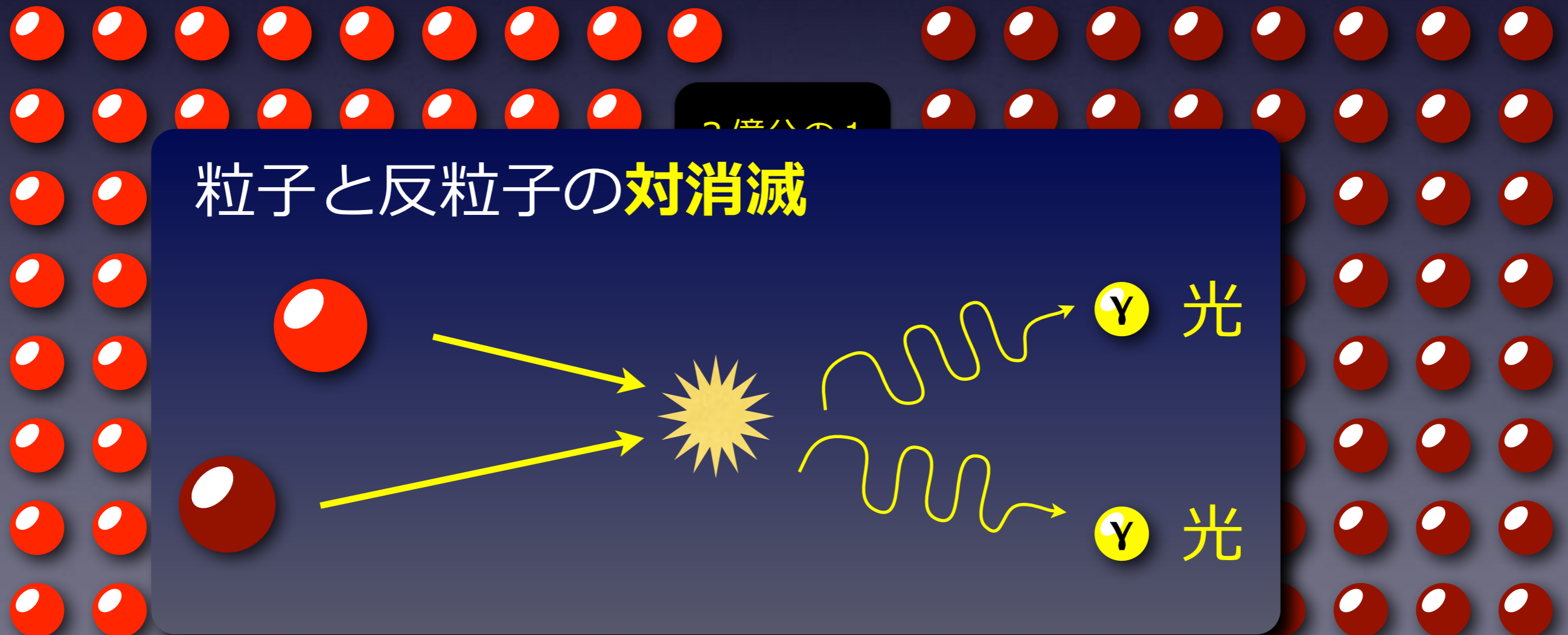
3億分の1
の差

宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

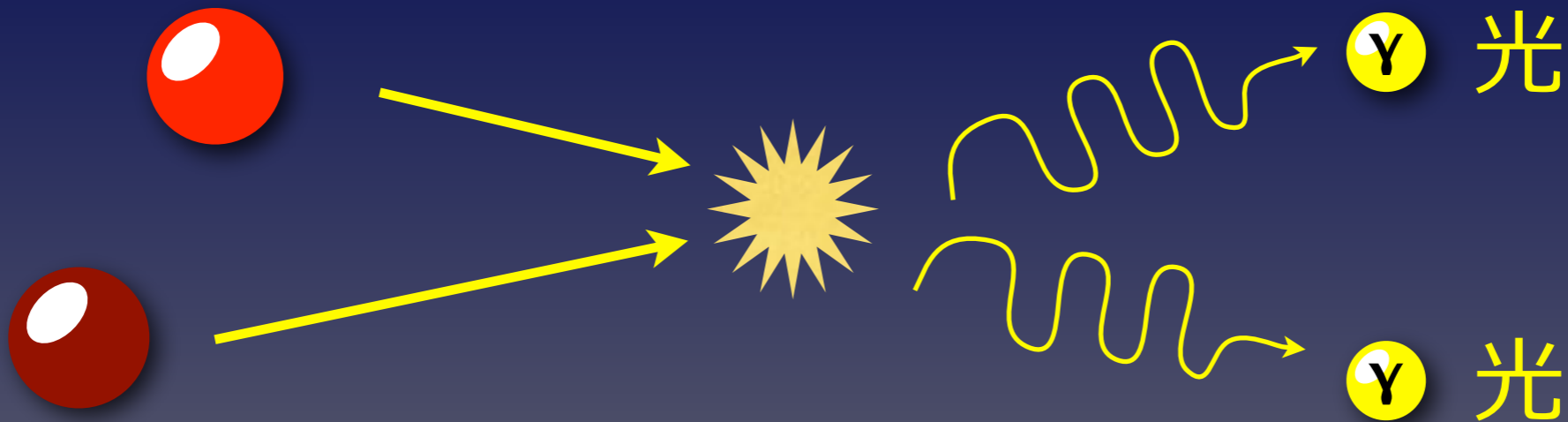
やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質

反物質



粒子と反粒子の**対消滅**



宇宙のずっと始めの頃は
物質と反物質がほぼ同数あった。

やがて温度が冷えてくると**対消滅**して・・・

物質だけが残った

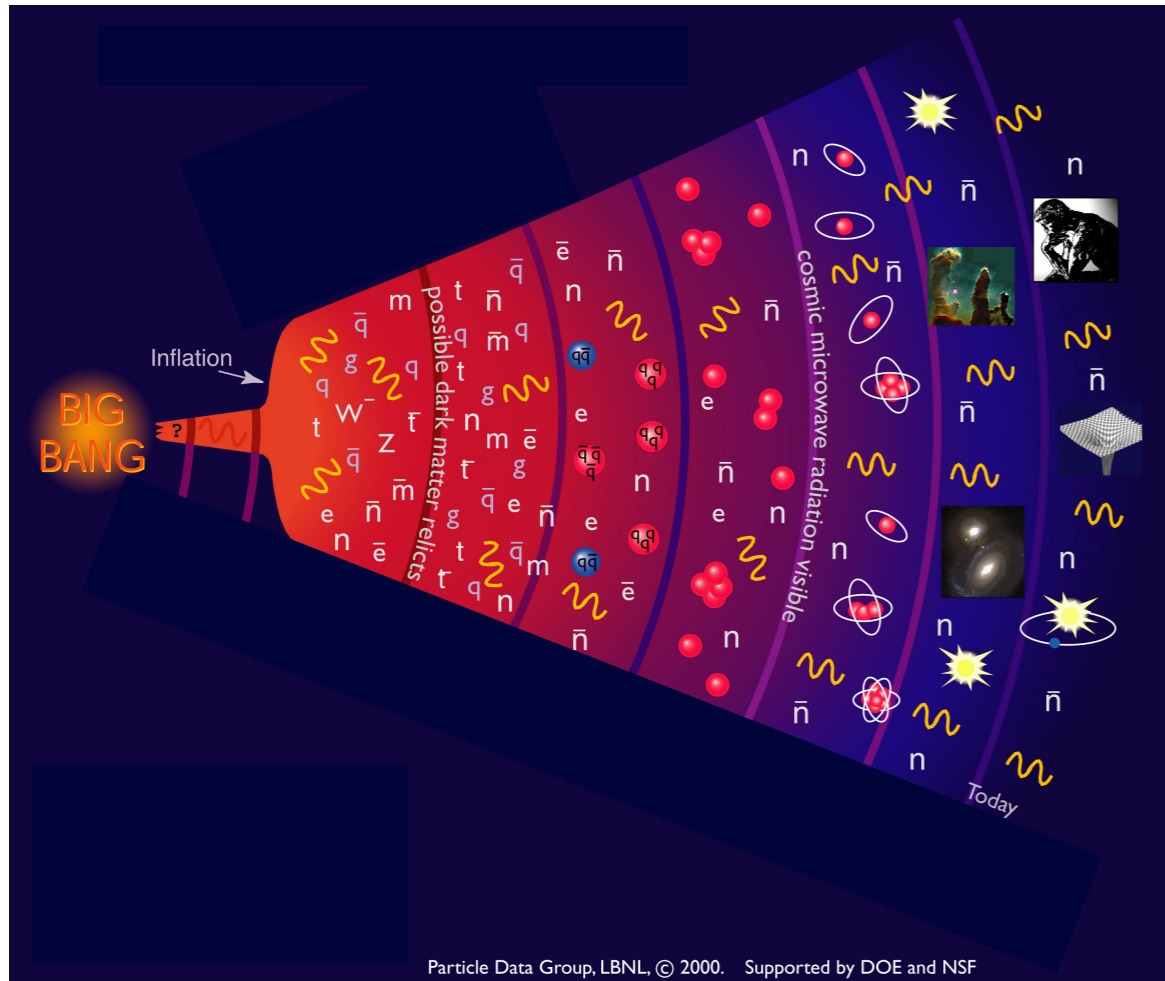


(反物質は消滅)

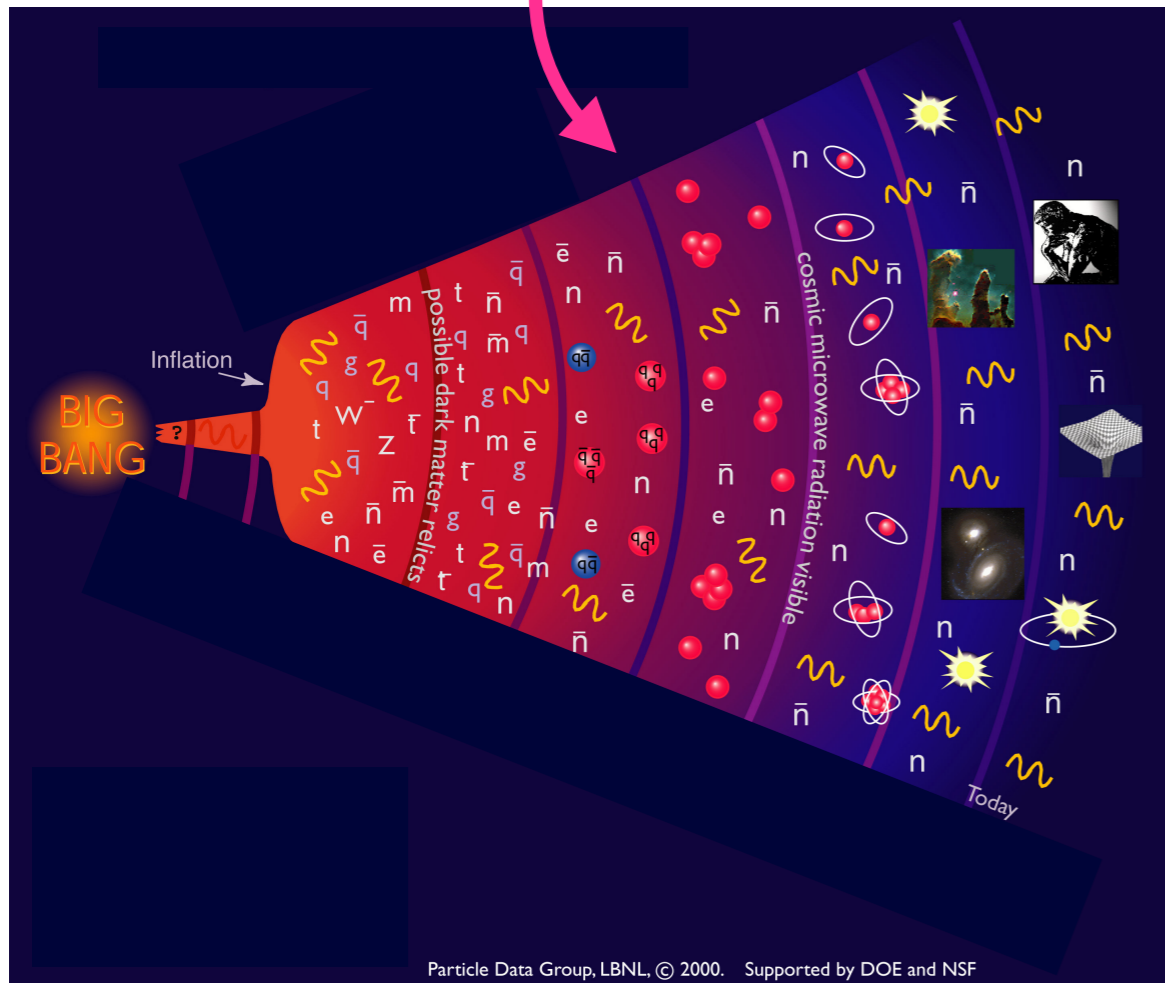


我々は（銀河も地球も人間の体も・・・）
この残った物質で出来ている！

観測値 (2つの独立な証拠)



観測値 (2つの独立な証拠)



(1) ビッグバン元素合成

(宇宙誕生後 1 秒～)

$$5.8 \leq \eta_{10} \leq 6.6 \text{ (95\% CL).}$$

$$\longleftrightarrow 0.021 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.024 \text{ (95\% CL).}$$

24. Big-Bang nucleosynthesis 3

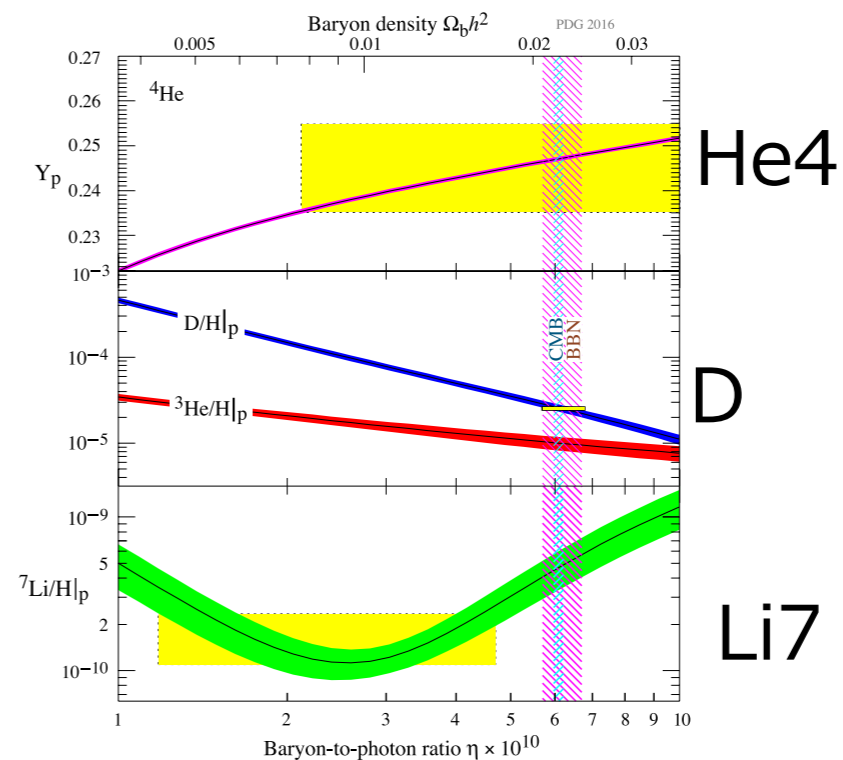
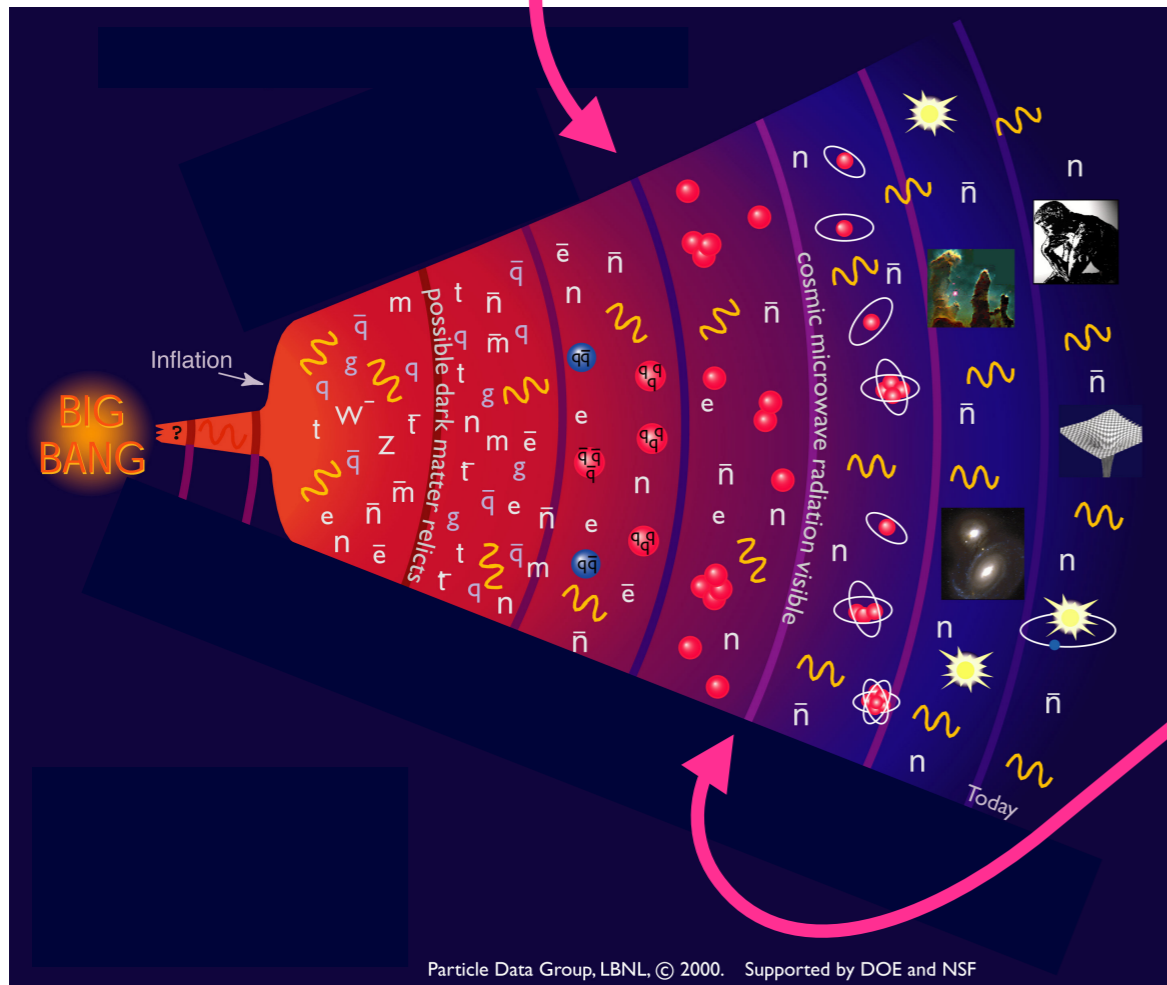


Figure 24.1: The primordial abundances of ${}^4\text{He}$, D, ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ as predicted by the standard model of Big-Bang nucleosynthesis—the bands show the 95% CL range [5]. Boxes indicate the observed light element abundances. The narrow vertical band indicates the CMB measure of the cosmic baryon density, while the wider band indicates the BBN concordance range (both at 95% CL).

[Particle Data Group]

観測値 (2つの独立な証拠)



(1) ビッグバン元素合成

(宇宙誕生後 1 秒～)

$$5.8 \leq \eta_{10} \leq 6.6 \text{ (95\% CL).}$$

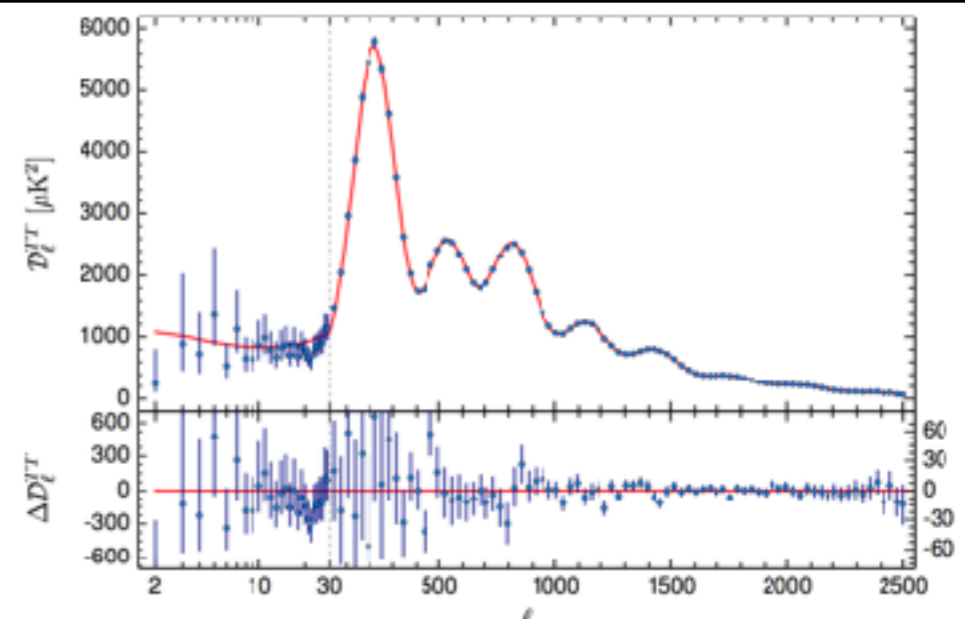
$$\longleftrightarrow 0.021 \leq \Omega_b h^2 \leq 0.024 \text{ (95\% CL).}$$

(2) 宇宙背景放射

(宇宙誕生後40万年～)

$$\Omega_b h^2 \dots 0.02222 \pm 0.00023 \text{ (68\%)}$$

[Planck 2015]



両者は consistent
(2)の方が高精度

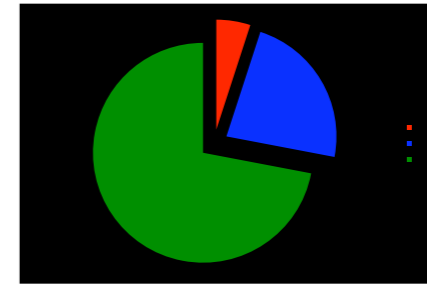
オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\underline{\Omega_b h^2 \approx 0.022}$$

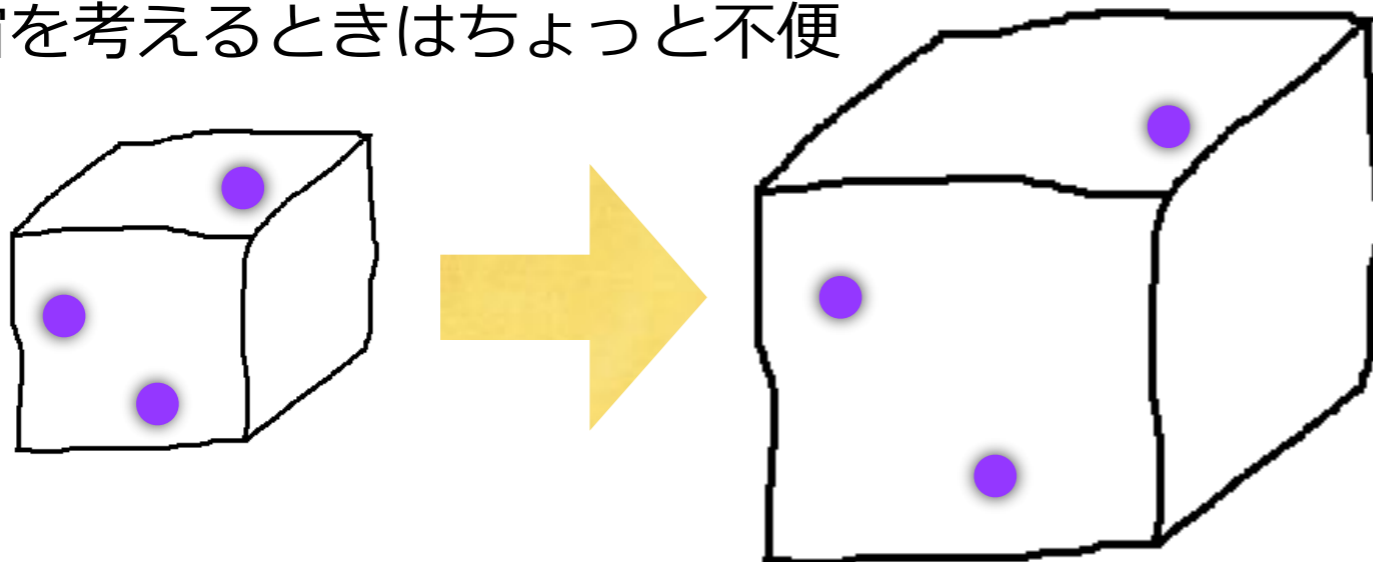
$\Omega_b =$ (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)

\approx 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 ≈ 0.05

$h \approx 0.67$ (規格化されたハッブル定数)



でも「密度」は膨張と共に変化するので
初期宇宙を考えるときはちょっと不便



オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\underline{\Omega_b h^2 \approx 0.022}$$

$\Omega_b =$ (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)

\approx 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 ≈ 0.05

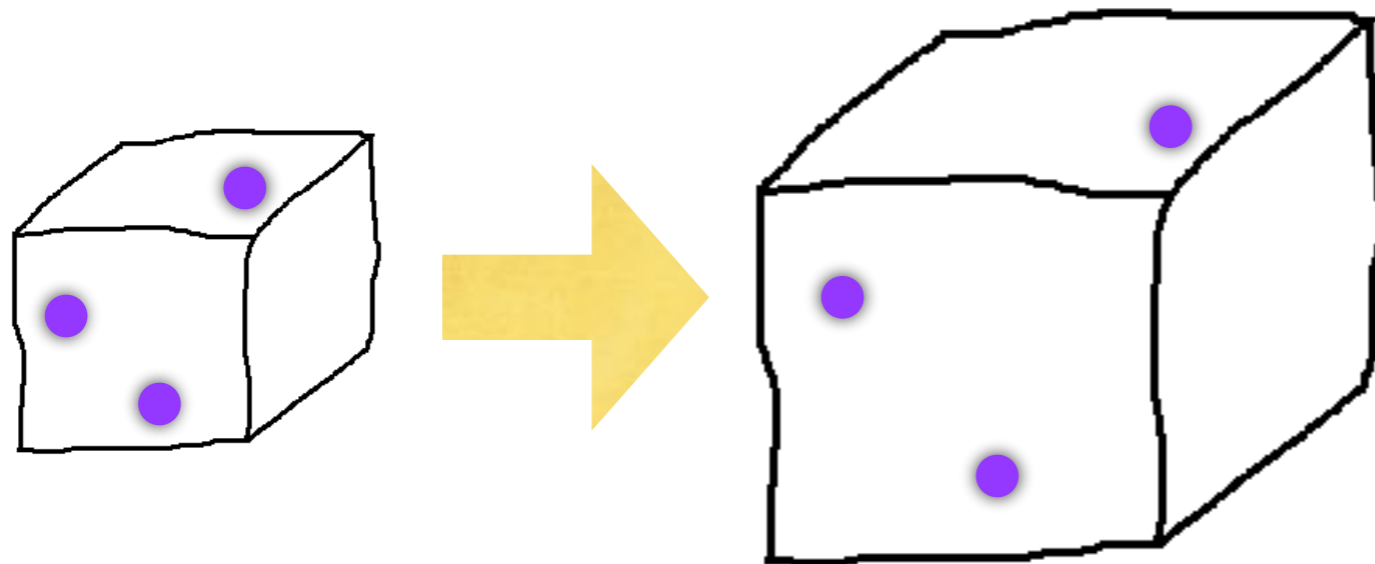
$h \approx 0.67$ (規格化されたハッブル定数)

$$\Leftrightarrow \underline{\eta = n_B/n_\gamma \approx 6.1 \times 10^{-10}}$$

$n_B = n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) =$ (バリオン数密度)

$n_\gamma =$ 光子数密度

..... 光子数密度で規格化しておけば、膨張に対して不変。



でも初期宇宙では光子数密度は膨張以外の影響も受けるので
(電子陽電子対消滅とか)
厳密に言うところでも少し不便。

オマケ：バリオン数の3通りの数え方

$$\underline{\Omega_b h^2 \approx 0.022}$$

$\Omega_b =$ (現在のバリオン質量密度) / (宇宙の臨界密度)

\approx 全宇宙のエネルギーに占めるバリオンの割合 ≈ 0.05

$h \approx 0.67$ (規格化されたハッブル定数)

$$\Leftrightarrow \underline{\eta = n_B/n_\gamma \approx 6.1 \times 10^{-10}}$$

$n_B = n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) =$ (バリオン数密度)

$n_\gamma =$ 光子数密度

$$\Leftrightarrow \underline{n_B/s \approx 0.87 \times 10^{-10}}$$

$n_B = n(\text{baryon}) - n(\text{anti-baryon}) =$ (バリオン数密度)

$s =$ (エントロピー密度)

バリオン数が保存している限り、

$n_B \propto a^{-3}, s \propto a^{-3} \rightarrow n_B/s = \text{const.}$

($a =$ scale factor)

オマケ2：バリオン数の符号について

「物質の方が反物質より多い」と言ったとき、その符号に意味はあるか？
(残った方を「物質」と名付けただけで、単なる convention では？)

もちろんそう名付けたんだけど、符号には意味がある。

「残ったのはどっちか」を知らなくても
どっちが「物質」かというのは定義出来る。

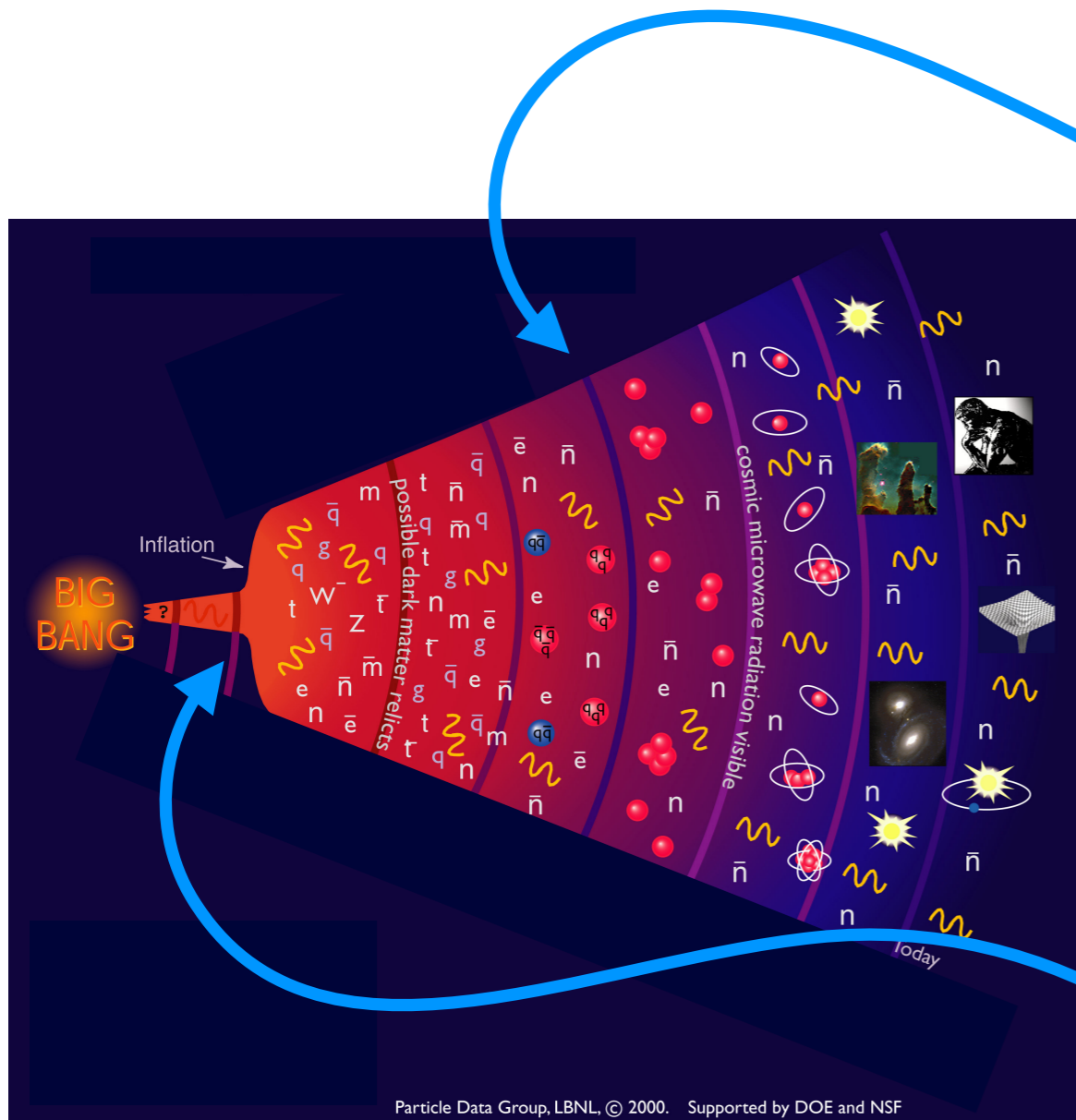
(例えば K_L の semi-leptonic 崩壊を見て多い方が「反レプトン」)

反物質で出来た宇宙 (ただしラグランジアンは同じ) に住む宇宙人と交信が出来たとして、
主成分が物質か反物質か聞きたければ、

「うちの電子は K_L の semi-leptonic 崩壊で少なく出る方だがお前んとこの電子はどっちだ？」
と聞けばよい。

宇宙のバリオン数はいつ作られたのか？

宇宙のバリオン数はいつ作られたのか？



遅くてもビッグバン元素合成まで

(宇宙誕生後 1 秒～温度 1 MeV より前)

でも実際に元素合成直前に作るのは難しいので
もっと前 (高温時) に作られたと思っている。

比較的低温で出来る例：

「電弱バリオジェネシス」

温度～100 GeV程度のときにバリオン数を生成。

インフレーションよりは後

インフレーションで何もかも薄められるので

インフレーション直後に作る例：

「non-thermal leptogenesis」

インフラトンの崩壊で右巻きニュートリノを作って
その崩壊でレプトジェネシス。

宇宙のバリオン数はいつ作られたのか？

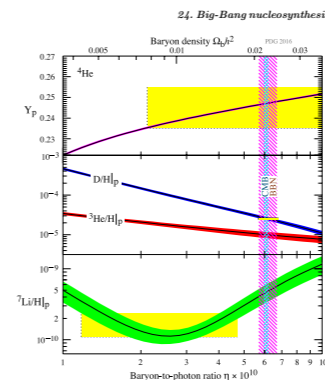
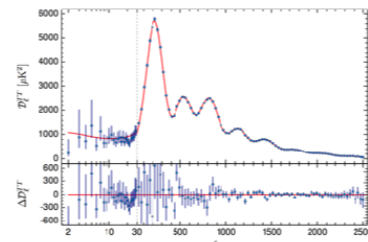
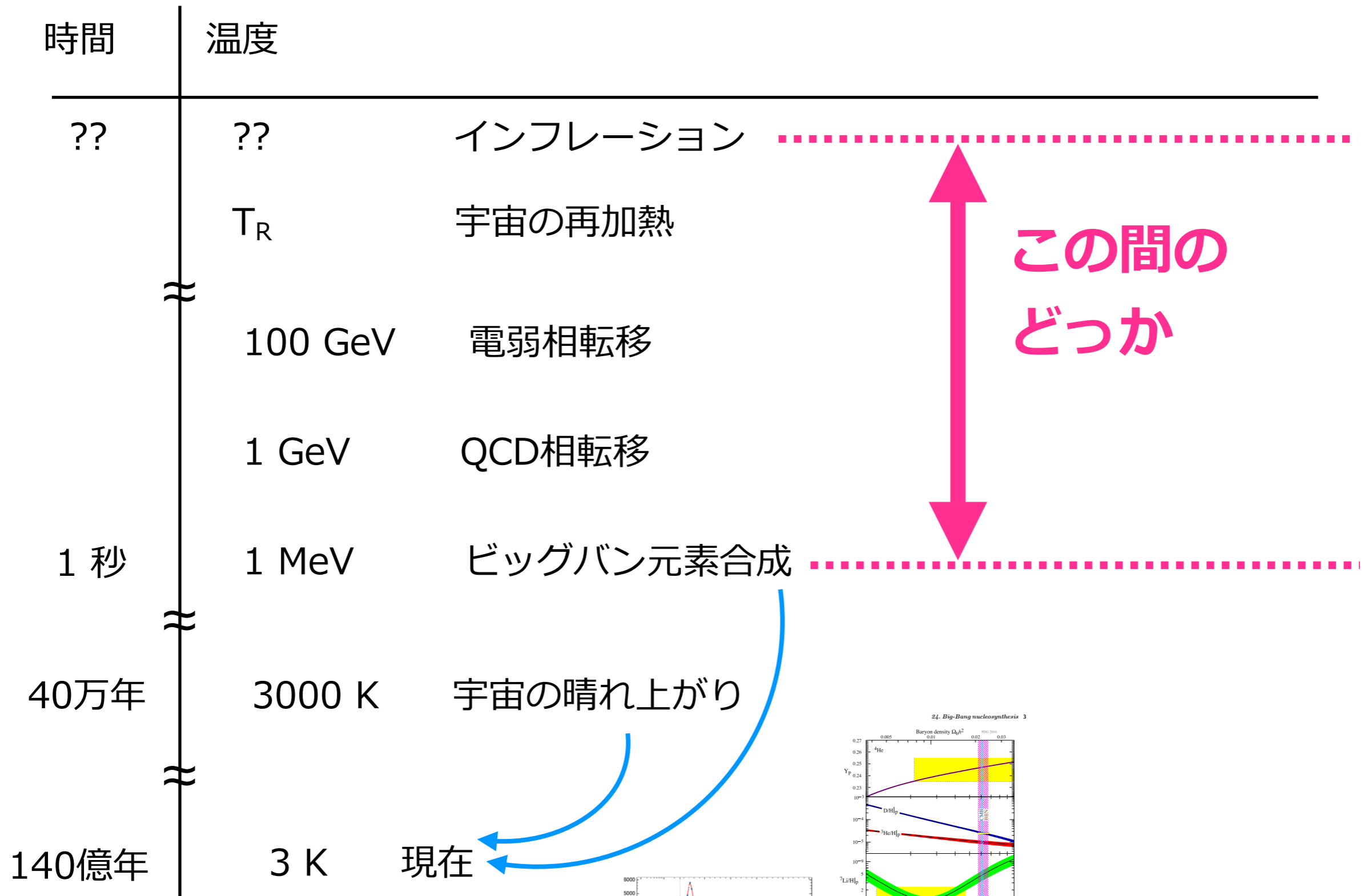


Figure 24.1: The primordial abundances of ${}^4\text{He}$, D , ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ as predicted by the standard model of Big-Bang nucleosynthesis—the bands show the 95% CL range [5]. Boxes indicate the observed light element abundances. The narrow vertical band indicates the CMB measure of the cosmic baryon density, while the wider band indicates the BBN concordance range (both at 95% CL).

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

サハロフの3条件

- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が厳密に保存してたら $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- C, CPの破れ

もしあらゆる素過程で CP が保存してたらやっぱり $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- 非平衡

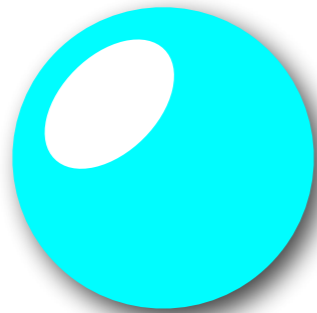
インフレーション後



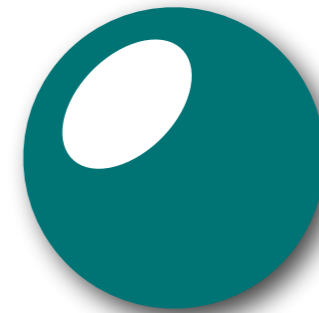
CP対称性 がある限り、物質と反物質の差は出ない。

インフレーション後

物質



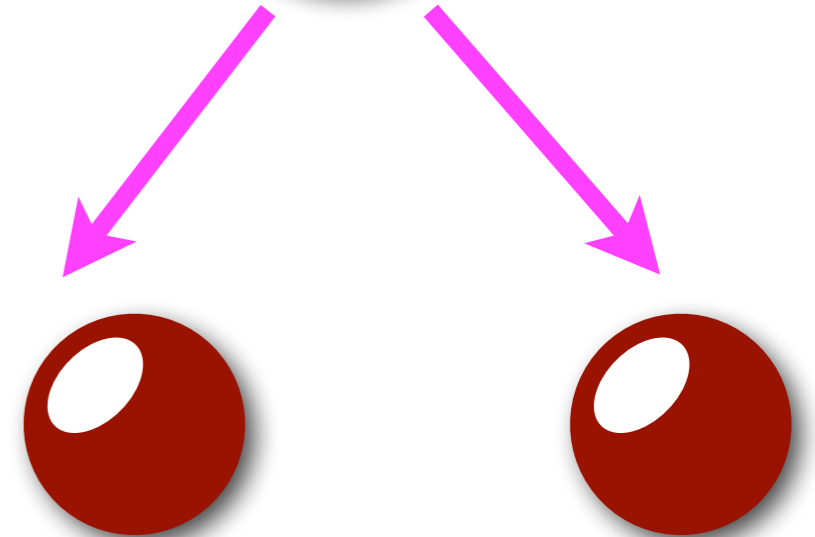
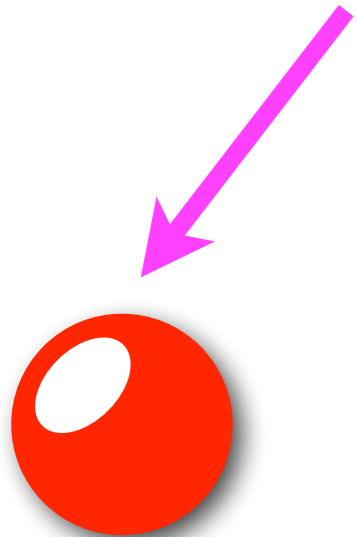
反物質



~~CP対称性~~



~~粒子と反粒子を
入れ替える対称性~~



CP対称性が破れていれば、物質と反物質の差が出る。

宇宙のバリオン数を作るには何が必要か？

サハロフの3条件

- バリオン数の破れ

もしあらゆる素過程でバリオン数が厳密に保存してたら $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- C, CPの破れ

もしあらゆる素過程で CP が保存してたらやっぱり $n_B = 0 \rightarrow n_B \neq 0$ は無理。

- 非平衡

もし $n_B < 0 \leftrightarrow n_B = 0 \leftrightarrow n_B > 0$ の反応が熱平衡状態にあったら、平衡点 ($n_B = 0$) に落ちついてしまう。

$n_B = 0 \xrightarrow{\quad} n_B > 0$ と非平衡になっていないといけない。

標準模型は？

バリオン数の破れ（後述）、 C , CP の破れ（CKM）の必要条件は満たしており、具体的なシナリオ（電弱バリオジェネシス）も考えられたが、、、

今では標準模型では物質>反物質の起源は説明出来ないことが分かっている。

理由1：物質>反物質に必要な非平衡が出来ない。

理由2：標準模型の CP の破れ（CKM位相）では定量的に足りない。

標準模型を超える物理による「バリオジェネシス」が必要。

もくじ

- (0 $\nu\beta\beta$ 崩壊)
- 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数（物質反物質）非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
 - ▶ バリオン数の計算の具体例
- レプトジェネシスと0 $\nu\beta\beta$ 崩壊
- 宣伝

なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

鍵を握るのは標準模型の「スファレロン」過程

なぜ「レプト」ジェネシスなのか？

鍵を握るのは標準模型の「スファレロン」過程

標準模型

classical level ではバリオン数(B)もレプトン数(L)も保存している。

$$\partial_\mu J_B^\mu = \partial_\mu J_L^\mu = 0$$

しかし quantum level では B も L も保存しない! [t Hooft,'76]

$$\partial_\mu J_B^\mu = \partial_\mu J_L^\mu = N_f \frac{g_2^2}{32\pi^2} \epsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \text{Tr} F^{\mu\nu} F^{\rho\sigma}$$

Note: $B-L$ は保存している。

$$\partial_\mu (J_B^\mu - J_L^\mu) = 0$$

幸か不幸か、低エネルギーでは B や L の破れは見えないが、、、

$$\Gamma_{B,L} \sim e^{-16\pi^2/g_2^2} \sim 10^{-170}$$

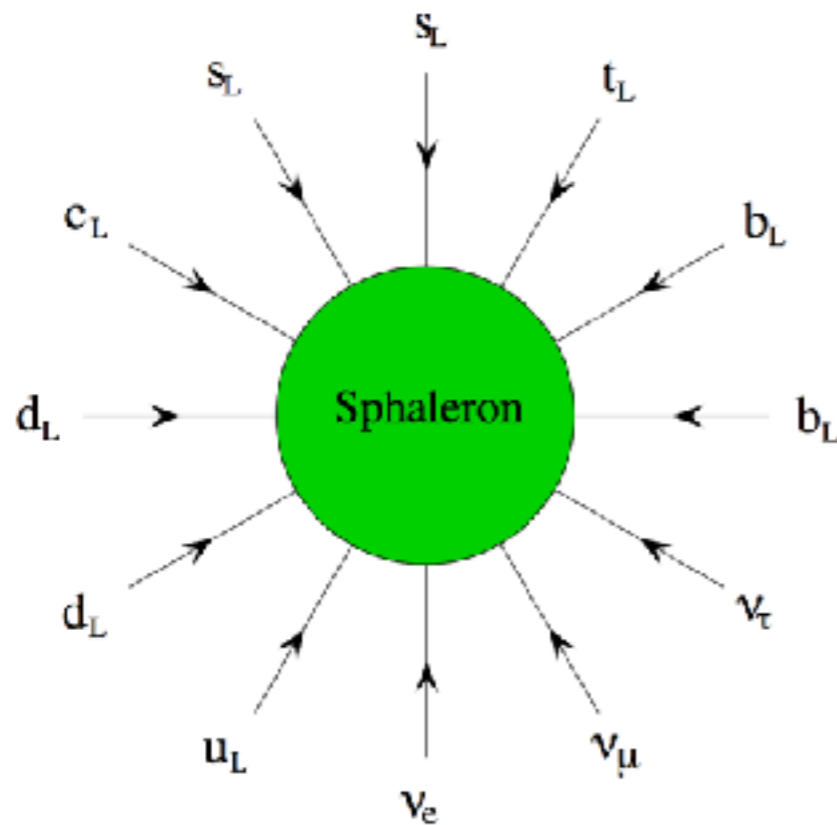
なぜ「レプト」 ジェネシスなのか？

鍵を握るのは標準模型の「スファレロン」過程

標準模型

温度が 100 GeV を超えると B や L を破るプロセスの rate が急上昇し熱平衡に！

[Kuzmin, Rubakov, Shaposhnikov,'85]



「スファレロン」過程

クォーク9個 ($B=3$) + レプトン3個 ($L=3$) の反応。
 $B-L$ は保存している。

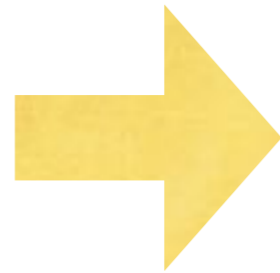
Figure 1: One of the 12-fermion processes which are in thermal equilibrium in the high-temperature phase of the Standard Model.

[fig. from W.Buchmuller, 1210.7758]

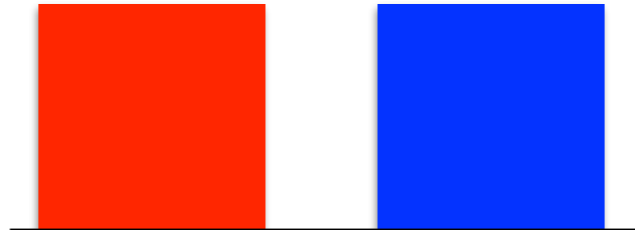
したがって、もし $B-L$ を保存するプロセスでバリオジェネシスをする、

例：GUT バリオジェネシス

$B=0$ $L=0$



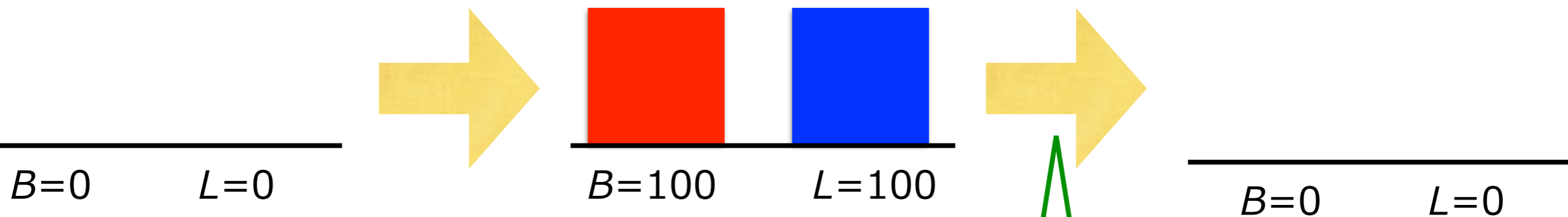
$B=100$ $L=100$



したがって、もし $B-L$ を保存するプロセスでバリオジェネシスをする、

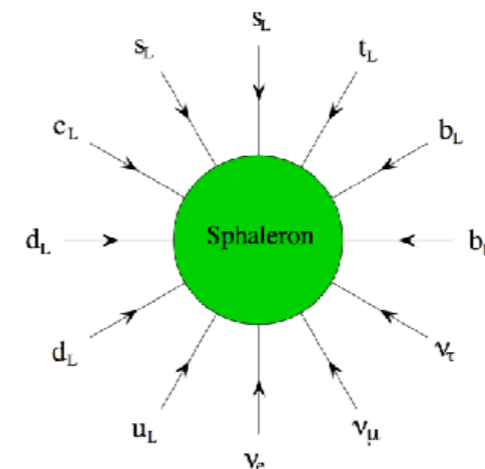
熱平衡で再び $B=0$ になってしまう。

例：GUT バリオジェネシス



スファレロン過程

**$B-L$ を破るプロセスによる
バリオジェネシスが必要。**



サハロフの3条件

- ~~バリオン数 (B) の破れ~~
 $B-L$ の破れ
- C, CP の破れ
- 非平衡

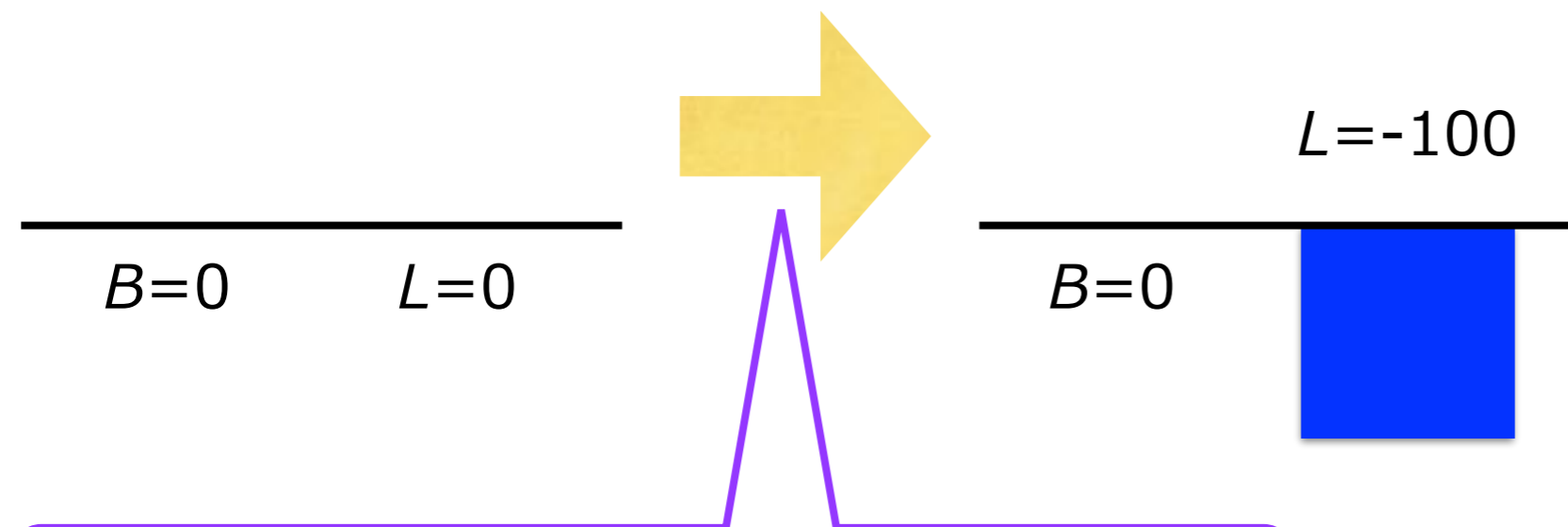
バリオジェネシスを起こすには
 B の破れではなく、 L の破れでも良い。

L の破れ ・ ・ ・ seesaw機構、マヨラナニュートリノ

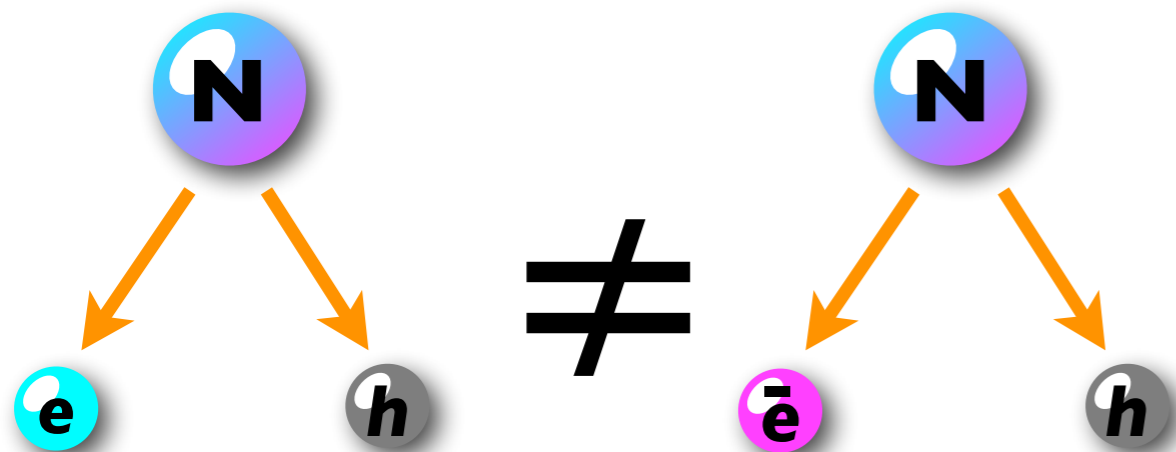
レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

まずレプトンの非対称性を作る



右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)

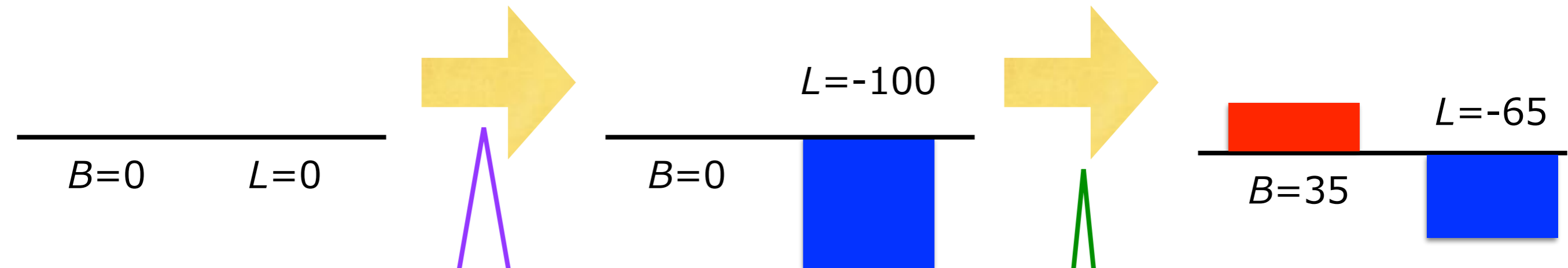


レプトジェネシス

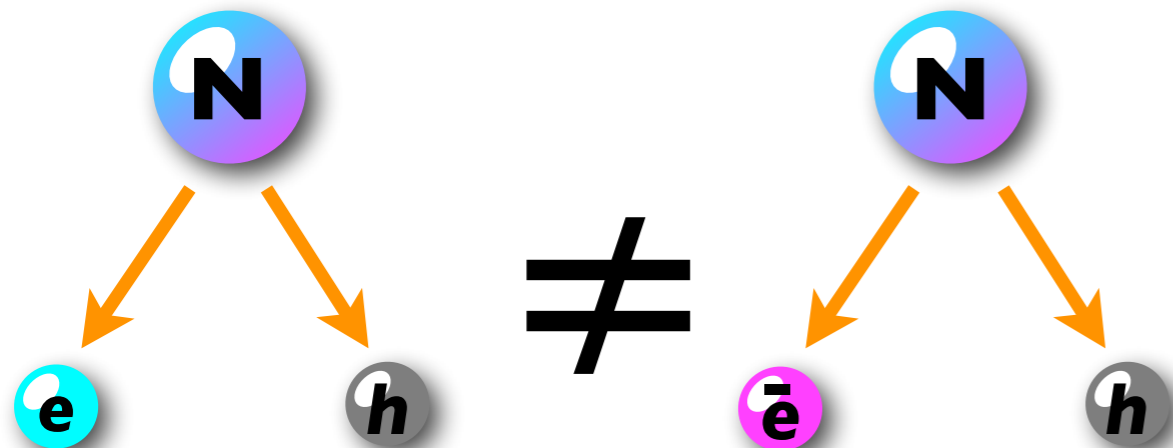
[Fukugita, Yanagida, '86]

まずレプトンの非対称性を作る

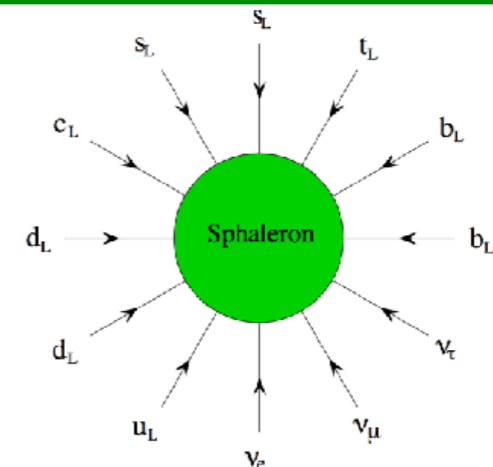
熱平衡で $B \neq 0$ が残る!



右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)



スファレロン過程



レプトジェネシス

[Fukugita, Yanagida, '86]

色んなバージョンがあります。

Thermal Leptogenesis

[Fukugita, Yanagida, '86, …… Buchmuller, Plumacher, Di Bari, ……]

Leptogenesis from Inflaton Decay

[…… Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99 ……]

Leptogenesis from R.H. Sneutrino dominated Universe

[Murayama, Yanagida, '93, …… KH, Murayama, Yanagida, '01 ……]

[Murayama, Suzuki, Yanagida, Yokoyama, '93, ……]

Affleck-Dine Leptogenesis

[Murayama, Yanagida, '93, …… Asaka, Fujii, KH, Yanagida, '00, Fujii, KH, Yanagida, '01, ……]

via R.H.N oscillation

[Akhmedov, Rubakov, Smirnov, '98, Asaka, Shasposhnikov, '05 ……]

(+ many others …)

Big picture 中のレプトジェネシス

Big picture 中のレプトジェネシス

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

暗黒エネルギー

平坦性問題

地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

Higgs 粒子

naturalness 問題

小さなニュートリノ質量

Big picture 中のレプトジェネシス



左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウンクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

標準模型の
クォークとレプトン

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$$

$$(3, 2)_{+1/6}$$

$$u_R$$

$$(\bar{3}, 1)_{-2/3}$$

$$d_R$$

$$(\bar{3}, 1)_{+1/3}$$

$$\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$$

$$(1, 2)_{-1/2}$$

$$e_R$$

$$(1, 1)_{+1}$$

電弱ハイパー電荷
(電荷みたいなもの)

強い力を受ける

強い力を受けない

弱い力を受ける

弱い力を受けない

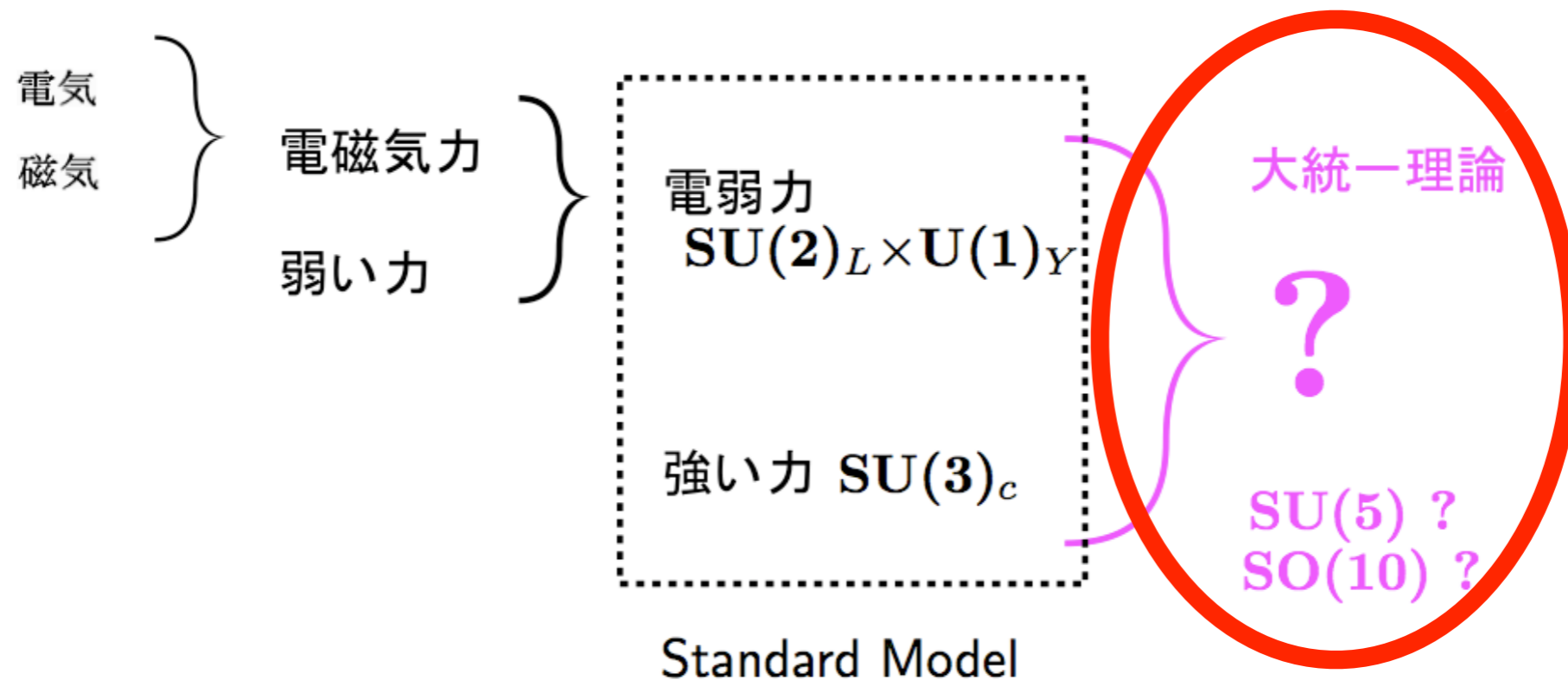
・・・なんかバラバラ！

謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。 統一的に理解出来ないのか??

おそらくこの謎の答えは・・・



謎: クォーク、レプトンの性質がバラバラ。

統一的に理解出来ないのか??

標準模型ではクォーク・レプトンはバラバラ

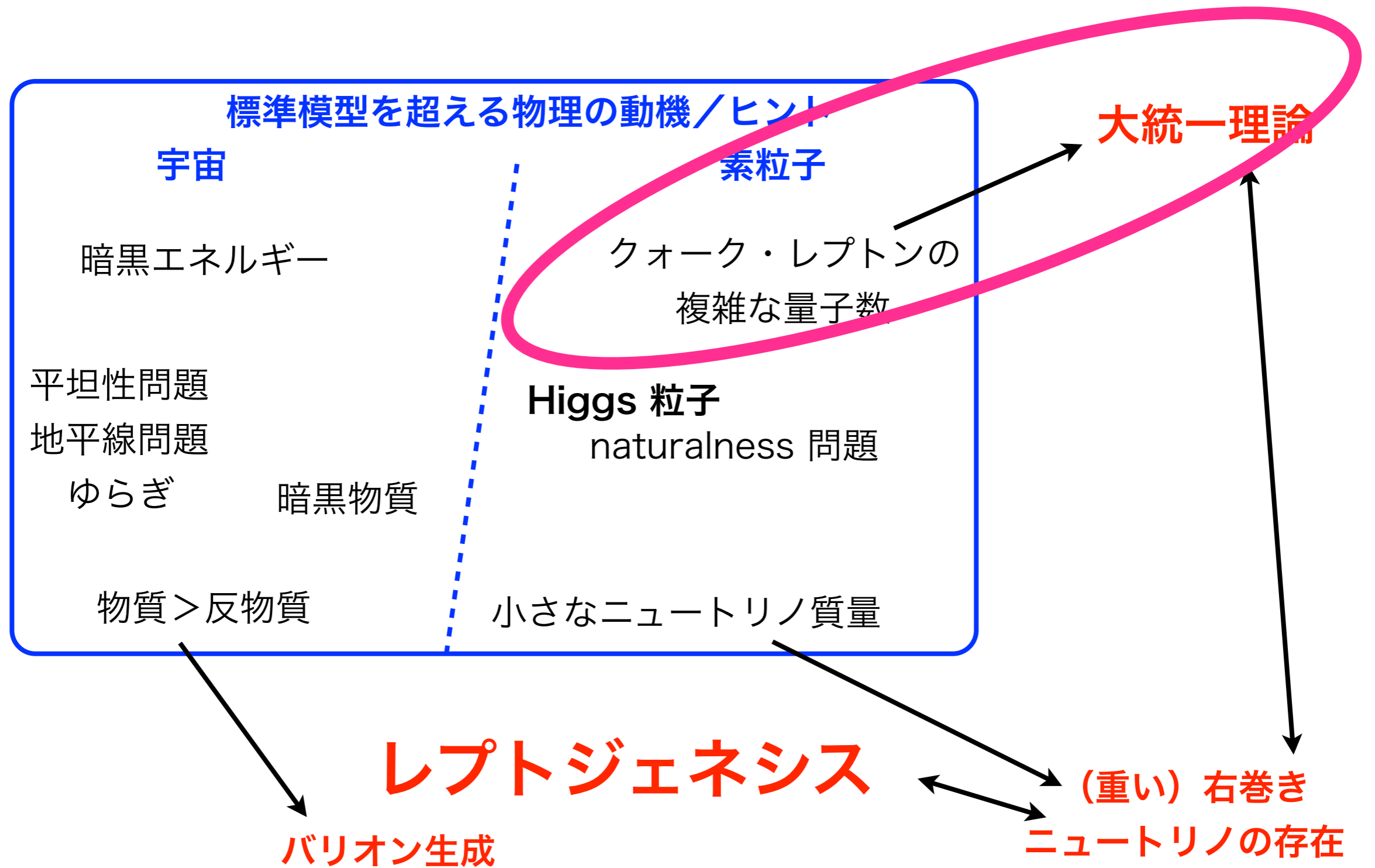
Diagram showing the representations of fermions in the Standard Model. The representations are arranged in a row: $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ (3, 2) $_{+1/6}$, $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_R$ ($\bar{3}$, 1) $_{-2/3}$, $\begin{pmatrix} d \end{pmatrix}_R$ ($\bar{3}$, 1) $_{+1/3}$, $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$ (1, 2) $_{-1/2}$, and e_R (1, 1) $_{+1}$. A blue oval highlights the $\begin{pmatrix} d \end{pmatrix}_R$ and $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$ representations, with a blue arrow pointing from the equation below to this oval.

$$1/3 + 1/3 + 1/3 - 1/2 - 1/2 = 0$$

大統一理論では . . . (SU(5)大統一理論の場合)

Diagram showing the representations of fermions in the SU(5) Grand Unified Theory. The representations are arranged in two groups: a 10 representation $\begin{pmatrix} u & u & d \\ d & u & e \end{pmatrix}$ and a $\bar{5}$ representation $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e & d \end{pmatrix}$. A blue oval highlights the $\bar{5}$ representation, with a blue arrow pointing from the equation above to this oval.

[Georgi, Glashow 1974]



標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

暗黒エネルギー

平坦性問題

地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

Higgs 粒子

naturalness 問題

小さなニュートリノ質量

大統一理論

レプトジェネシス

バリオン生成

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

謎：ニュートリノの質量

$$\begin{array}{ccccc} \left(\begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \right)_L & \left(\text{u} \right)_R & \left(\text{d} \right)_R & \left(\begin{array}{c} \text{e} \\ \nu_e \end{array} \right)_L & \left(\text{e} \right)_R \\ (3, 2)_{+1/6} & (\bar{3}, 1)_{-2/3} & (\bar{3}, 1)_{+1/3} & (1, 2)_{-1/2} & (1, 1)_{+1} \end{array}$$

左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウルクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

謎：ニュートリノの質量

The diagram shows five fermion representations in a dark grey rounded rectangle. From left to right: 1. A doublet of up (u) and down (d) quarks in a left-handed state, labeled $(3, 2)_{+1/6}$. 2. A singlet of up (u) quarks in a right-handed state, labeled $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$. 3. A singlet of down (d) quarks in a right-handed state, labeled $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$. 4. A doublet of electron (e) and electron neutrino (ν_e) in a left-handed state, labeled $(1, 2)_{-1/2}$. 5. A singlet of electron (e) in a right-handed state, labeled $(1, 1)_{+1}$. A red arrow points from the bottom towards the $(1, 2)_{-1/2}$ representation.

左巻きクォーク $(3, 2)_{+1/6}$ 右巻きアップクォーク $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$ 右巻きダウルクォーク $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$ 左巻きレプトン $(1, 2)_{-1/2}$ 右巻きレプトン $(1, 1)_{+1}$

よく見るとニュートリノは左巻きしかない
・・・質量を持たない！（質量ゼロ）
しかしニュートリノ質量はある！



謎：ニュートリノの質量

最も有力な解決方法は・・・

左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウルクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

謎：ニュートリノの質量

最も有力な解決方法は・・・

Diagram showing the Standard Model fermion representations in SU(3) x SU(2) x U(1) notation:

- $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L$ $(3, 2)_{+1/6}$
- u_R $(\bar{3}, 1)_{-2/3}$
- d_R $(\bar{3}, 1)_{+1/3}$
- $\begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix}_L$ $(1, 2)_{-1/2}$
- e_R $(1, 1)_{+1}$

Diagram showing the right-handed neutrino representation:

- N $(1, 1)_0$

左巻き
クォーク

右巻き
アップクォーク

右巻き
ダウンクォーク

左巻き
レプトン

右巻き
レプトン

右巻き
ニュートリノ

右巻きニュートリノを足してしまう

右巻きニュートリノ、実はすごい

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$\left(\begin{array}{ccc} \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \text{e} \text{R} \end{array} \right) \quad \left(\begin{array}{cc} \text{e} & \\ \text{v}_e \text{L} & \begin{array}{c} \text{d} \\ \text{u} \end{array} \text{R} \end{array} \right)$$

10 5

SU(5)
大統一

+

$$\begin{array}{c} \text{N} \\ (1,1)_0 \end{array}$$

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \text{e} \text{R} & \text{e} & \text{v}_e \text{L} & \begin{array}{c} \text{d} \\ \text{u} \end{array} \text{R} & \text{N}_i \text{R} \end{array} \right)$$

16

SO(10)
大統一

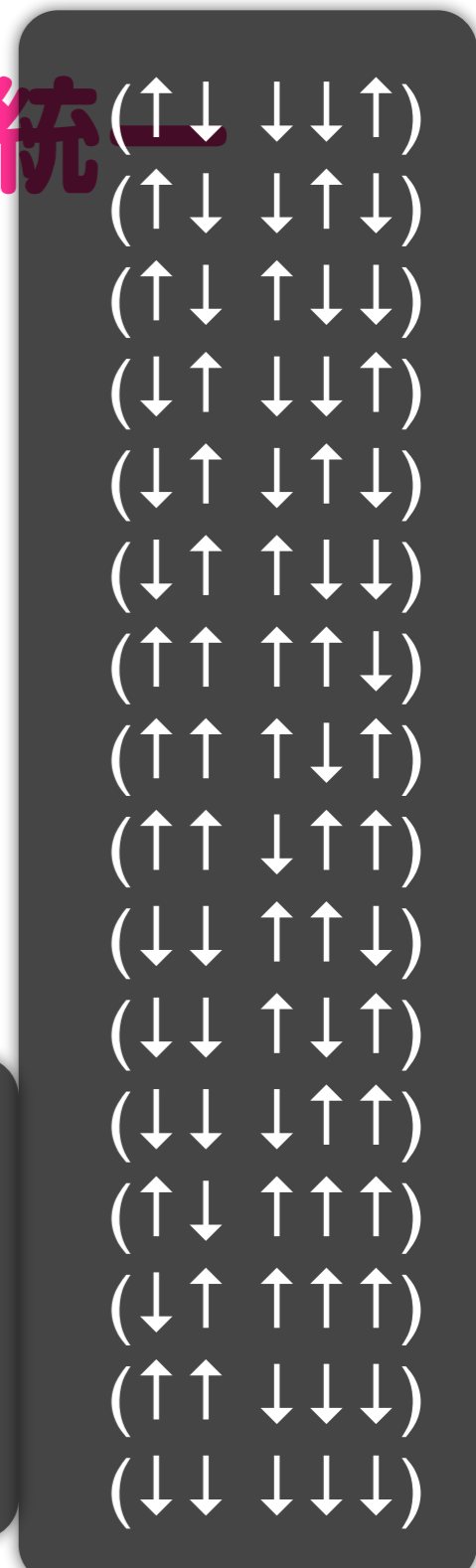
全てのクォーク
レプトンが統一！

右巻きニュートリノ、実はすごい

① クォーク・レプトンがさらに統一

$$= \left(\begin{array}{cccccc} \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \text{L} & \begin{array}{c} \text{e} \\ \text{v}_e \end{array} \text{R} & \begin{array}{c} \text{u} \\ \text{d} \end{array} \text{R} & \text{N}_i \text{R} \end{array} \right) =$$

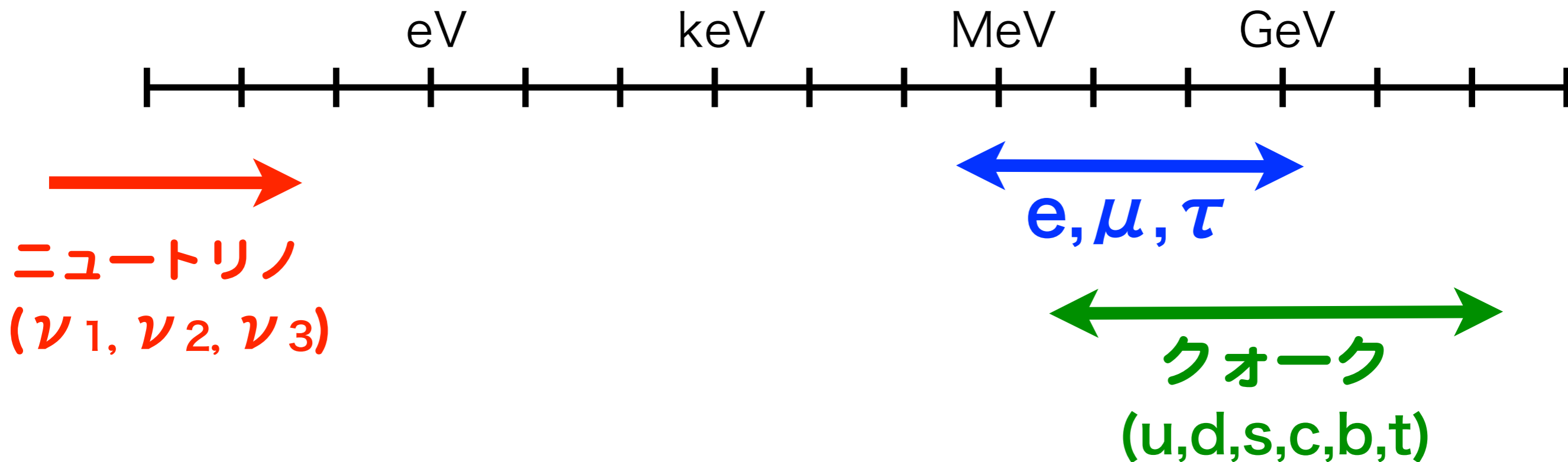
16



右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

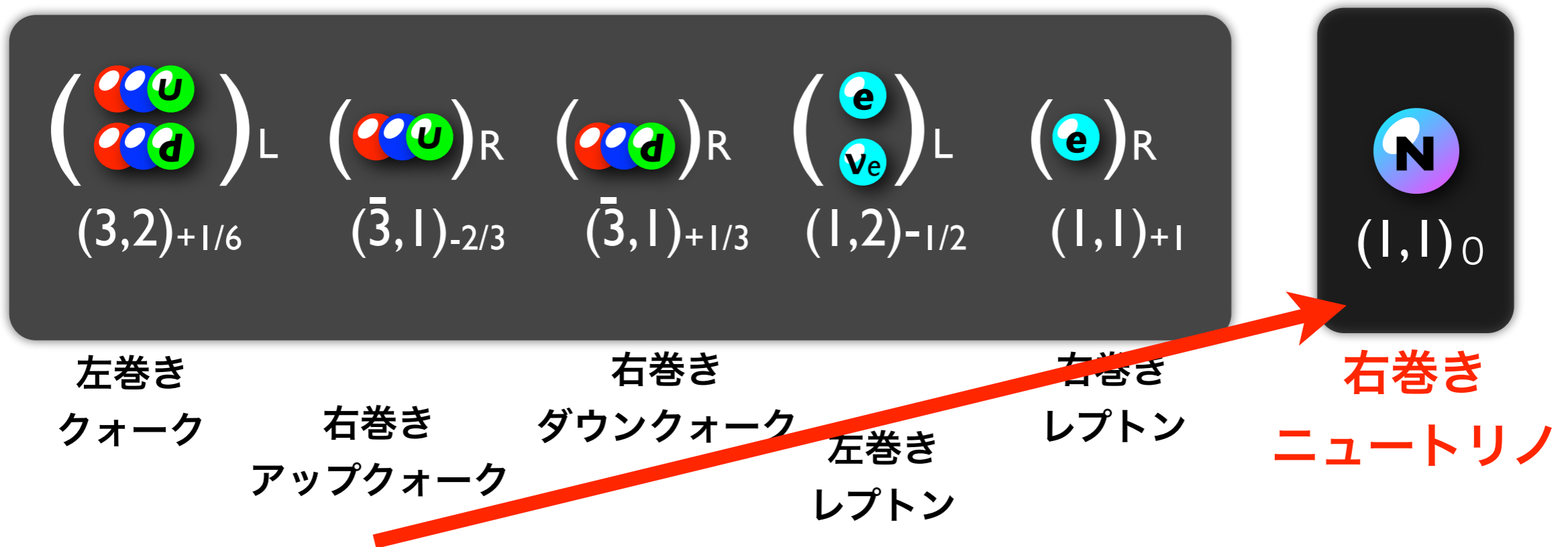
クォーク、レプトンの質量



・・・何でニュートリノだけこんなに軽いのか？

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

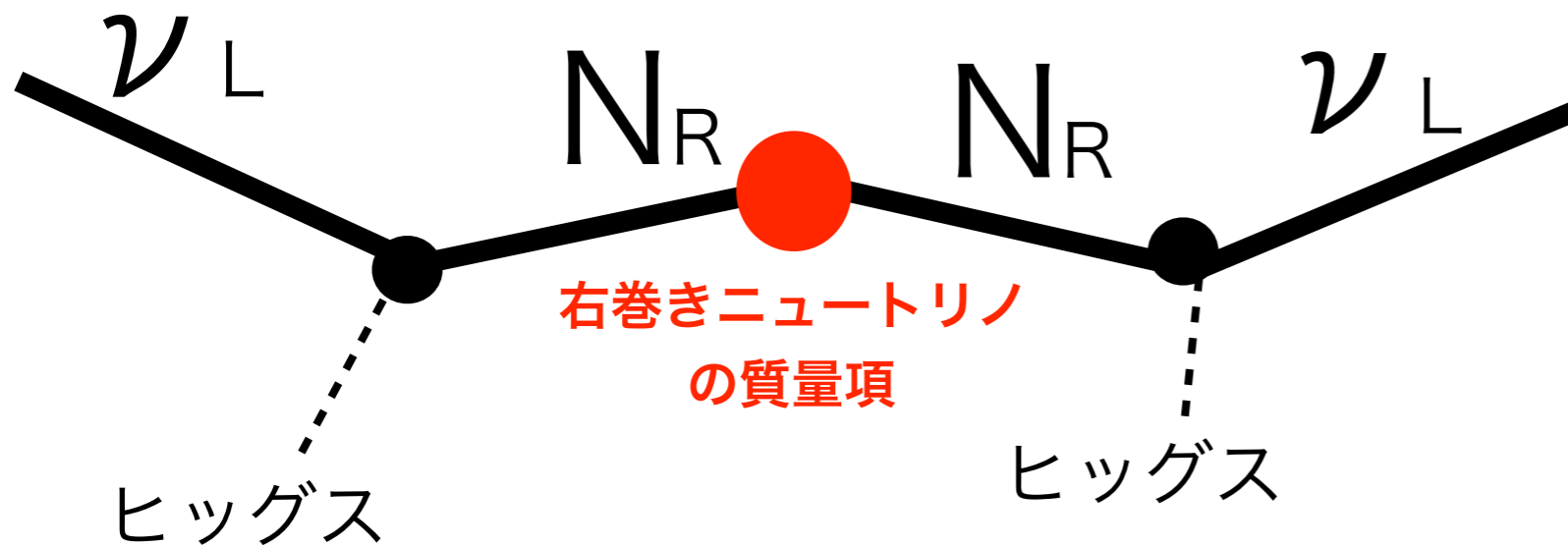


実はこいつだけ特別！ 電磁気・弱い力・強い力どれとも反応しない。

- 電荷を全く持ってない。
- 自分自身の反粒子になれる。
- 自分だけで質量を持てる！

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明

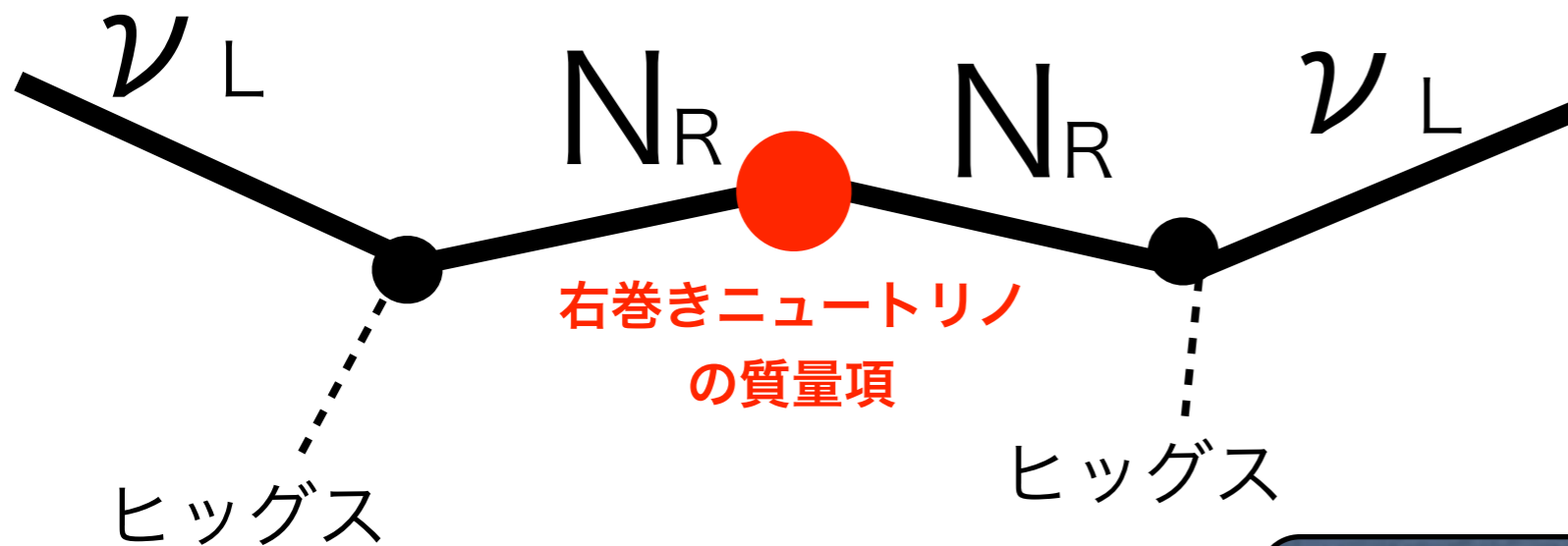


$$\text{(振動実験とかで見える) ニュートリノ質量} = \frac{\text{(他のクォークやレプトンの質量くらい)}^2}{\text{右巻きニュートリノ質量}}$$

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)
(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



e.g. 100 GeV

(他のクォークやレプトンの質量くらい)²

(振動実験とかで見える)

ニュートリノ質量

0.01 eV

右巻きニュートリノ質量

e.g. 10¹⁵ GeV

右巻き ν : 重い \rightarrow 観測される ν 質量 : 軽い (“シーソー”)

(大統一理論スケールくらいの重さの右巻き ν で、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

② 小さなニュートリノ質量を説明



右巻きニュートリノ
の質量

(振動実験とかで
ニュートリノ)

このときニュートリノは
マヨラナになる
→ $0\nu\beta\beta$ 崩壊!!!

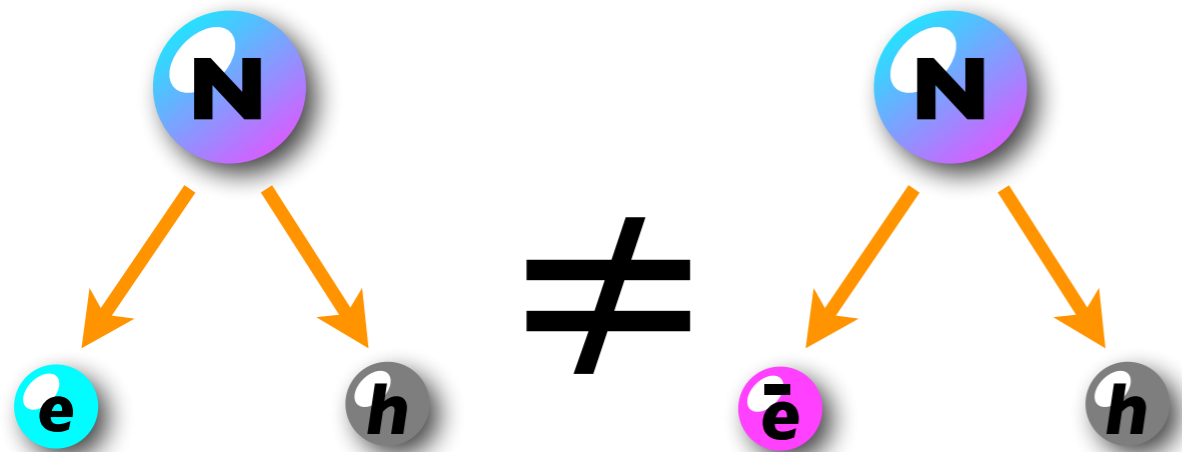
右巻き ν : 重ニュートリノ (「シーソー」)
(大統一理論スケールで、実験値を説明出来る!)

右巻きニュートリノ、実はすごい

③ 宇宙の物質 > 反物質を・・・

→ レプトジェネシス !!

右巻きニュートリノの崩壊 (CP-violating)



標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

暗黒エネルギー

平坦性問題

地平線問題

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

素粒子

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

Higgs 粒子

naturalness 問題

小さなニュートリノ質量

大統一理論

レプトジェネシス

バリオン生成

(重い) 右巻き

ニュートリノの存在

標準模型を超える物理の動機/ヒント

宇宙

素粒子

暗黒エネルギー

クォーク・レプトンの
複雑な量子数

大統一理論

平坦性問題
地平線問題

Higgs 粒子
naturalness 問題

超対称性 ???

ゆらぎ

暗黒物質

物質 > 反物質

小さなニュートリノ質量

(重い) 右巻き

インフレーション

レプトジェネシス

ニュートリノの存在

バリオン生成

その他については時間がないので省略しますが、、、

バリオン数の計算の具体例

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

``Leptogenesis in inflaton decay" の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida,'99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

inflatonの数

再加熱温度

$$\frac{n_{\text{inf}}}{s} = \frac{3}{4} \cdot \frac{T_R}{m_{\text{inf}}}$$

インフレーション模型
によって決まる。

inflaton の質量

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

inflaton 1 個あたり右巻きニュートリノ何個作られるか

2体崩壊で作られると仮定

右巻き
ニュートリノの数

$$\frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} = 2 \cdot \text{Br}(\text{inflaton} \rightarrow N_R N_R)$$

inflatonの数

単に崩壊分岐比

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

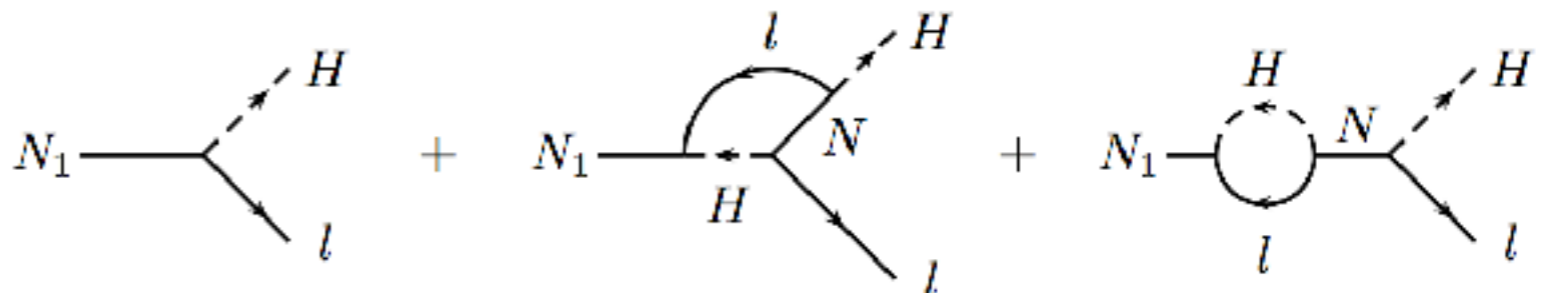
“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

右巻きニュートリノ 1 個あたりどれだけレプトン数が作られるか

$$\frac{n_L}{n_{N_R}} = \frac{\Gamma(N_R \rightarrow \ell H) - \Gamma(N_R \rightarrow \bar{\ell} H^*)}{\Gamma(N_R \rightarrow \text{all})} \equiv \epsilon_1$$



バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

右巻きニュートリノ 1 個あたりどれだけレプトン数が作られるか

$$\frac{n_L}{n_{N_R}} = \frac{\Gamma(N_R \rightarrow \ell H) - \Gamma(N_R \rightarrow \bar{\ell} H^*)}{\Gamma(N_R \rightarrow \text{all})} \equiv \epsilon_1$$

$$= \dots = \frac{3}{16\pi} \frac{M_R}{\langle H \rangle^2} m_\nu \delta_{\text{eff}}$$

右巻きニュートリノ質量 (左巻き)ニュートリノ質量
effective CP phase

Higgs VEV = 174 GeV

[cf. KH, Murayama, Yanagida, '01, Davidson, Ibarra, '02] 70

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

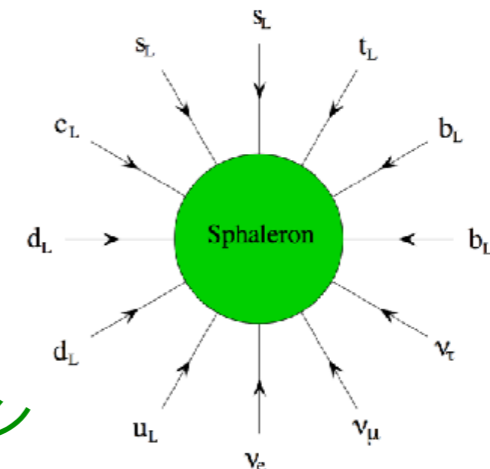
$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

作られたレプトン数のうちバリオン数に移る割合

$$\frac{n_B}{n_L} = \frac{8N_f + 4}{22N_f + 13} = \frac{28}{79} \simeq 0.35$$

[Khlebnikov, Shaposhnikov, '88,
Hurvey, Turner, '90]

スファレロン



バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

全部合わせると . . .

$$\begin{aligned} &\simeq 2.5 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{m_{\nu 3}}{0.05 \text{ eV}} \right) \delta_{\text{eff}} \quad \text{effective CP phase} \\ &\times \text{Br}_{(\text{inf} \rightarrow NN)} \cdot \left(\frac{T_R}{10^7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{2m_{N_R}}{m_{\text{inf}}} \right) \\ &\quad \text{崩壊分岐比} \quad \text{再加熱温度} \quad \text{右巻きニュートリノ質量} \\ &\quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \quad \text{inflaton の質量} \end{aligned}$$

バリオン数の計算の具体例

目標: $\frac{n_B}{s} \Big|_{\text{obs}} \simeq 0.87 \times 10^{-10}$

“Leptogenesis in inflaton decay” の場合

[cf. Asaka, KH, Kawasaki, Yanagida, '99]

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_{\text{inf}}}{s} \times \frac{n_{N_R}}{n_{\text{inf}}} \times \frac{n_L}{n_{N_R}} \times \frac{n_B}{n_L}$$

全部合わせて・・・

$$\begin{aligned} &\simeq 2.5 \times 10^{-10} \cdot \left(\frac{m_{\nu 3}}{0.05 \text{ eV}} \right) \delta_{\text{eff}} \quad \text{effective CP phase} \\ &\times \text{Br}_{(\text{inf} \rightarrow NN)} \cdot \left(\frac{T_R}{10^7 \text{ GeV}} \right) \left(\frac{2m_{N_R}}{m_{\text{inf}}} \right) \end{aligned}$$

崩壊分岐比 再加熱温度 右巻きニュートリノ質量 inflaton の質量

適切なパラメータを持ってくれば観測値を説明出来る。

もくじ

- (0 $\nu\beta\beta$ 崩壊)
- 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
 - ▶ バリオン数の計算の具体例
- レプトジェネシスと0 $\nu\beta\beta$ 崩壊
- 宣伝

レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

すみません！

新学術研究会で「もう出来ます」と言い続けて 2年。

まだ論文出来てません。

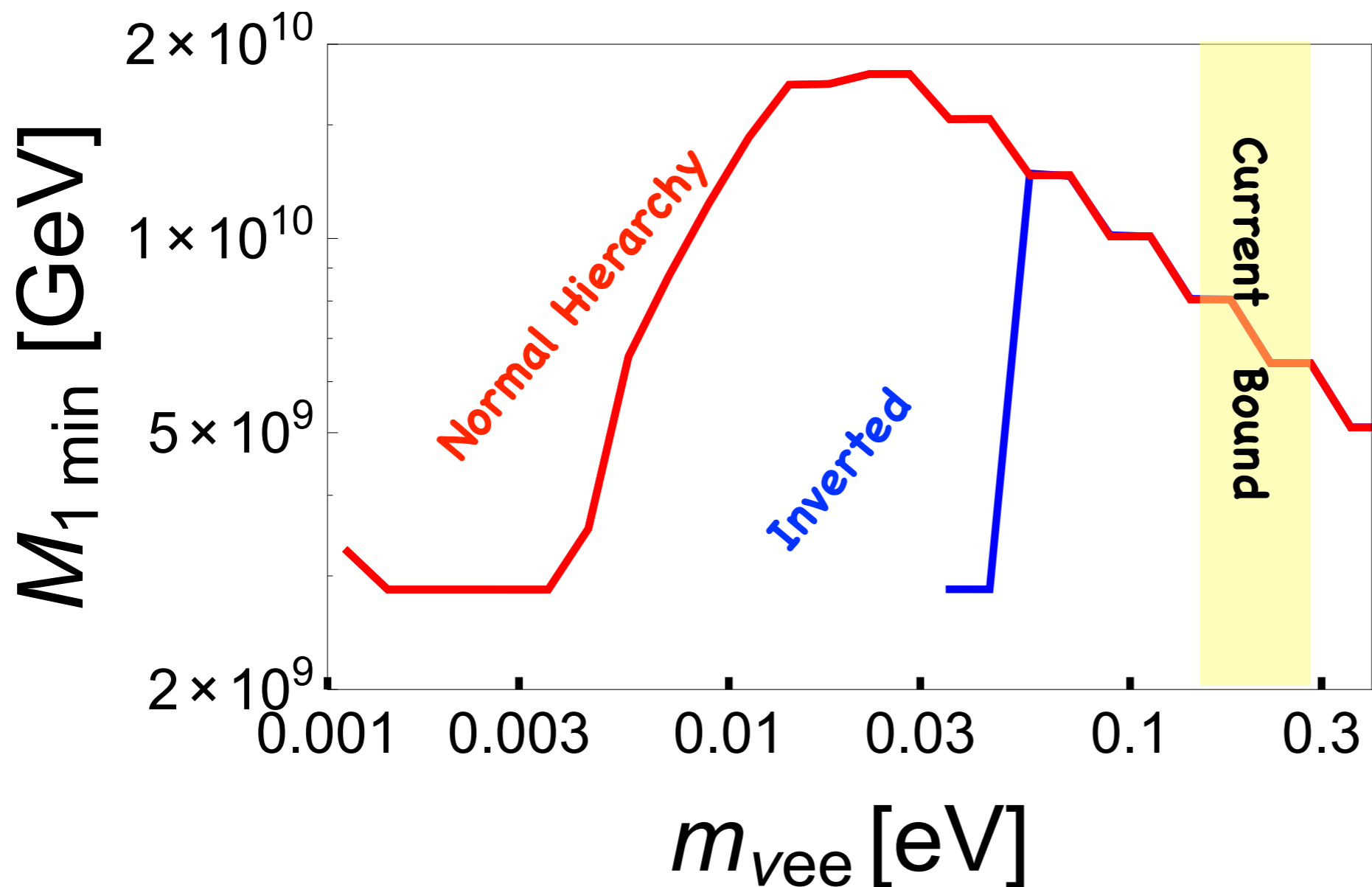
今年こそ完成させます。必ず・・多分・・・

レプトジェネシスと $0\nu\beta\beta$ 崩壊

preliminary $o(1)$ factor may change

結論 $m_{\nu ee}$ が分かれば (Thermal Leptogenesis を仮定すると)

右巻きニュートリノの質量の下限が分かる！



K.Hamaguchi, K.Shimada,
in preparation.

(Assuming $M_1 \ll M_{2,3}$.

With flavor effect.

Neglecting scattering and
spectator effects for simplicity.)

もくじ

- (0 $\nu\beta\beta$ 崩壊)
- 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
 - ▶ バリオン数の計算の具体例
- レプトジェネシスと0 $\nu\beta\beta$ 崩壊
- 宣伝

Predictions for the neutrino parameters in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model

Kento Asai¹, Koichi Hamaguchi^{1,2}, Natsumi Nagata¹

¹*Department of Physics, University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*

²*Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe (Kavli IPMU),
University of Tokyo, Kashiwa 277-8583, Japan*

Abstract

We study the structure of the neutrino mass matrix in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model, where three right-handed neutrinos are added to the Standard Model in order to obtain non-zero masses for active neutrinos. Because of the $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ gauge symmetry, the structure of both Dirac and Majorana mass terms of neutrinos is tightly restricted. In particular, the *inverse* of the neutrino mass matrix has zeros in the (μ, μ) and (τ, τ) components, namely, this model offers a symmetric realization of the so-called two-zero-minor structure in the neutrino mass matrix. Due to these constraints, all the CP phases—the Dirac CP phase δ and the Majorana CP phases α_2 and α_3 —as well as the mass eigenvalues of the light neutrinos m_i are uniquely determined as functions of the neutrino mixing angles θ_{12} , θ_{23} , and θ_{13} , and the squared mass differences Δm_{21}^2 and Δm_{31}^2 . We find that this model predicts the Dirac CP phase δ to be $\delta \simeq 1.59\pi-1.70\pi$ ($1.54\pi-1.78\pi$), the sum of the neutrino masses to be $\sum_i m_i \simeq 0.14-0.22$ eV ($0.12-0.40$ eV), and the effective mass for the neutrinoless double beta decay to be $\langle m_{\beta\beta} \rangle \simeq 0.024-0.055$ eV ($0.017-0.12$ eV) at 1σ (2σ) level, which are totally consistent with the current experimental limits. These predictions can soon be tested in future neutrino experiments.

$\mu - \tau$ number を
gauge 化した minimal な模型
(motivationとか省略・・・)
についてニュートリノ質量行列を
調べてみたら・・・
とんでもなく予言能力が高い事
が分かりました。

Dirac CP phase の予言

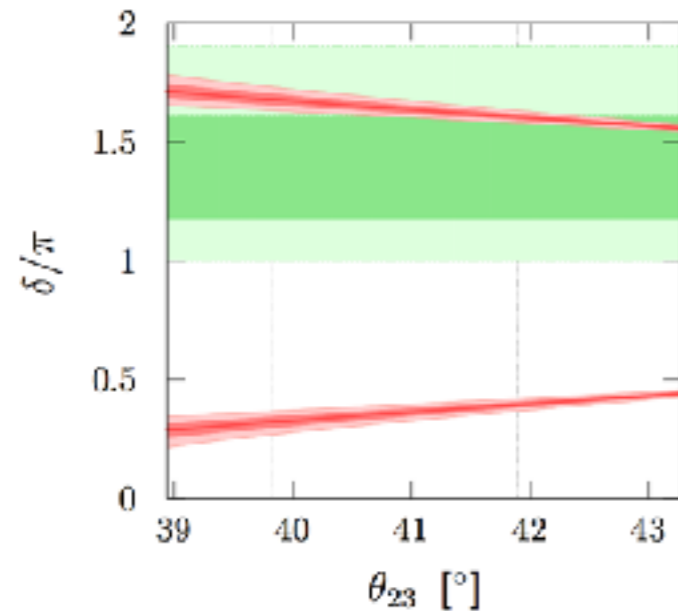


Figure 2: The prediction for the Dirac CP phase δ in the minimal gauged model. The red lines show the CP phase δ against θ_{23} . θ_{23} is varied in the 2σ range, and the 1σ range is in between the vertical thin dotted lines. The dark (light) red band shows the uncertainty coming from the 1σ (2σ) errors in the parameters θ_{12} , θ_{13} , δ . We also show the 1σ (2σ) favored region of δ in the dark (light) horizontal band.

$$\delta/\pi \simeq 1.59 - 1.70 \quad (1\sigma)$$

$$1.54 - 1.78 \quad (2\sigma)$$

$0\nu\beta\beta$ 崩壊への予言

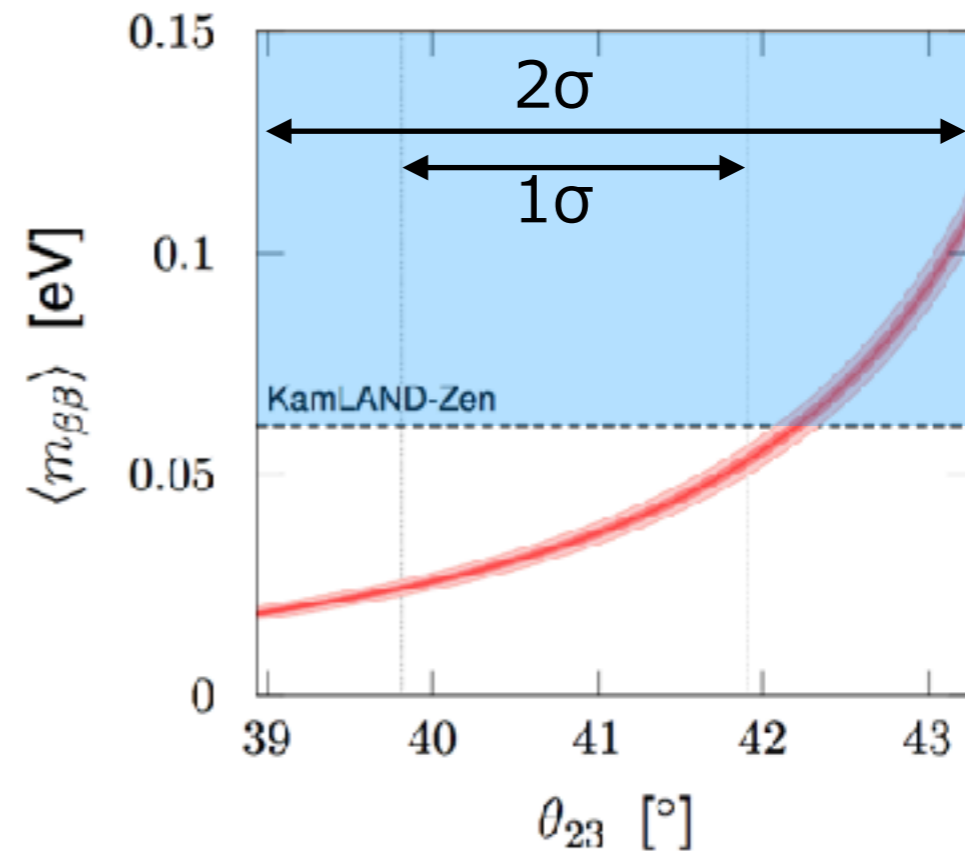


Figure 4: The prediction for the effective Majorana neutrino mass $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ as a function of θ_{23} in the minimal gauged $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model. The dark (light) red band shows the uncertainty coming from the 1σ (2σ) errors in the parameters other than θ_{23} . The entire region is within the 2σ range of θ_{23} , while its 1σ range is between the thin vertical dotted lines. We also show the strongest limit from KamLAND-Zen, $\langle m_{\beta\beta} \rangle < 0.061$ eV, in the black dashed line [66].

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle \simeq 0.024 - 0.055 \text{ eV} \quad (1\sigma)$$

$$0.017 - 0.120 \text{ eV} \quad (2\sigma)$$

KamLAND-Zen に期待しています！

もくじ

- (0 $\nu\beta\beta$ 崩壊)
- 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性
 - ▶ 宇宙のバリオン数 (物質反物質) 非対称性って？
 - ▶ いつ作られたのか？
 - ▶ 作るには何が必要か？
- レプトジェネシス
 - ▶ なぜ「レプト」ジェネシスなのか？
 - ▶ Big picture の中のレプトジェネシス
 - ▶ バリオン数の計算の具体例
- レプトジェネシスと0 $\nu\beta\beta$ 崩壊
- 宣伝

おしまい